

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Diplomová práce

2017

Bc. Eliška Pavelková

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

**Parametrická studie těsnící zátky v hlubinném úložišti radioaktivních
odpadů**

Parametric Study of Sealing Plug for Deep Nuclear Waste Repository

Student:

Bc. Eliška Pavelková

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Eliška Pavelková**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3607T035 Geotechnika**
Téma: **Parametrická studie těsnící zátky v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů**
Parametric Study of Sealing Plug for Deep Nuclear Waste Repository
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky těsnících zátek hlubinného úložiště radioaktivních odpadů
2. Charakteristika experimentální těsnící zátky ve stole Josef realizované v rámci projektu DOPAS, analýza získaných experimentálních výsledků
3. Realizace modelové parametrické studie těsnící zátky respektující požadavky budoucího hlubinného úložiště v ČR
4. Analýza výsledků modelování různých variant těsnící zátky
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Dvořáková, M., Hanusová, I., Svoboda, J., Vencel, M. EXPERIMENT EPSP – STAVBA ZÁTKY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ V RÁMCI EVROPSKÉHO PROJEKTU DOPAS. *Tunel* 2/2014.s.4-10.
2. Vašíček, R. et al. *Deliverable D3.17- Interim results of EPSP laboratory testing, DOPAS project FP7 EUROATOM*, no. 323273. *Průběžná zpráva projektu DOPAS*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2014, 32 s.
3. Večerník, P et al. *Odborná podpora při provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS. Přehledná zpráva o provedených pracích v roce 2013*. Praha: ÚJV ŘEŽ a.s., 2013. 32 s.
4. White, M et al. *Deliverable D2.1 Design Bases and Criteria, DOPAS project FP7 EUROATOM*, no. 323273. *Průběžná zpráva projektu DOPAS*. Galson Sciences Limited, 2013, 95 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry

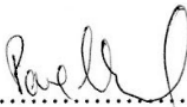


prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 29. 11. 2017


.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí mé diplomové práce, doc. RNDr. Evě Hrubéšové, Ph.D., za její odborné rady a čas, který mi věnovala při řešení této problematiky. Také by ráda poděkovala Ing. Markétě Dohnálkové ze společnosti SÚRAO za poskytnutí potřebných materiálů k vypracování této práce.

Tímto bych chtěla poděkovat mým rodičům, rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mých studií.

Anotace

Tato diplomová práce s názvem „ Parametrická studie těsnící zátky v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů“ je zaměřena na charakteristiku experimentální těsnící zátky ve štolě Josef realizované v rámci projektu DOPAS, návrh vlastních tvarových i materiálových variant těsnící zátky, numerické modelování experimentální zátky i navržených variant zátky, analýzu získaných výsledků variantních modelů těsnící zátky a jejich porovnání a případná doporučení optimalizace tvaru a materiálových charakteristik pro budoucí použití v hlubinném úložišti.

Úkolem práce je tvorba různých návrhů těsnící zátky. Návrhy jsou zpracovány do 3D numerických modelů vytvořených v geotechnickém programu MIDAS GTS NX. Vstupní materiálové i geometrické parametry použité pro modely těsnících zátek byly převzaty z experimentu EPSP, projektu DOPAS. Chybějící charakteristiky materiálu a horninového prostředí byly čerpány z odborné literatury a internetových stránek, které byly doplněny k návrhům těsnící zátky.

Výstupem práce je zhodnocení návrhů těsnících zátek a zjištění, která varianta je pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů nejvhodnější

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, radioaktivní odpady, těsnící zátka, numerický model, MIDAS GTS NX, bentonit, stříkaný vláknobeton, granodiorit, drenážní beton,

Annotation

This diploma thesis titled „Parametric study of pressure and sealing plug in deep repository for radioactive waste“ focuses on characteristics of the experimental pressure and sealing plug constructed as a part of the DOPAS project in Josef underground laboratory. Furthermore this thesis deals with personal proposals of form and material-based variations of the experimental pressure and sealing plug, numeric formation and suggested variations of the experimental pressure and sealing plug, gained results analysis and its comparison, potential recommendation for form and material – based optimalization and its future use in deep repository.

The aim of this thesis is to come up with different options for pressure and sealing plugs. These suggestions were created via MIDAS GTS NX program in 3D numeric models. Initial material and geometric parameters of pressure and sealing plugs were adopted from DOPAS project and its EPSP experiment. Lacking material and rock environs characteristics were drawn from expert literature and addend to pressure and sealing plug recommendations.

The outcome of this thesis is assessment of pressure and sealing plugs suggestions and the discovery of the best option for deep repository for radioactive waste.

Key words

Deep repository, radioactive waste, pressure and sealing plug, numeric model, MIDAS GTS NX, bentonite , sprayed fiber concrete, granodiorite , drainage concrete

Obsah

Anotace	7
Klíčová slova.....	7
Annotation.....	8
Key words	8
Seznam použitého značení	11
1. Úvod do problematiky těsnících zátek hlubinného úložiště radioaktivních odpadů	13
1.1 Charakteristika radioaktivních odpadů	13
1.2 Původci radioaktivních odpadů v České republice.....	13
1.3 Členění radioaktivních odpadů	14
1.4 Ukládání radioaktivních odpadů.....	15
1.4.1 Ukládání nízko a středněaktivních odpadů	15
1.4.2 Ukládání vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva	16
1.5 Hlubinné úložiště	16
1.6 Konstrukční řešení hlubinného úložiště	18
1.7 Těsnící zátka	18
2. Charakteristika experimentální těsnící zátky ve štole Josef realizované v rámci projektu DOPAS, analýza získaných experimentálních výsledků.....	21
2.1 DOPAS.....	21
2.2 EPSP experiment	22
2.3 Charakteristika použitých materiálů	25
2.4 Návrh a statické posouzení EPSP	28
2.5 Geotechnický monitoring	29
3. Realizace modelové parametrické studie těsnící zátky respektující požadavky budoucího hlubinného úložiště v ČR.....	31
3.1 Softwarový program MIDAS GTS NX	31
3.2 Horninové prostředí	32
3.3 Materiál těsnících zátek.....	35

3.4 Postup modelování těsnících zátek	41
3.4.1 Mohr-Coloumbův modelový typ	44
3.4.2 Elastický (pružný) modelový typ	46
3.5 Návrhy těsnících zátek	47
3.5.1 1. návrh těsnící zátky	47
3.5.2 2. návrh těsnící zátky	48
3.5.3 3. návrh těsnící zátky	49
4. Analýza výsledků modelování různých variant těsnící zátky	51
4.1 Deformace ve směru osy x (podélná osa zátky)	51
4.2 Napětí v tahu	57
4.3 Napětí v tlaku	59
4.4 Maximální smykové napětí	63
4.5 Plastické body	69
5. Závěr	73
6. Seznam použité literatury	75
7. Seznam obrázků	77
8. Seznam tabulek	79
9. Seznam grafů	80

Seznam použitého značení

c	soudržnost	[MPa]
cca	přibližně	
ČR	Česká republika	
ČVUT	České učení technické v Praze	
DOPAS	Demonstration Of Plug And Seals	
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
EPSP	Experiment Pressure and Sealing Plug	
g/cm ³	gram na centimetr krychlový	
GPa	gigapascal	
GTS NX	Geo – Technical analysis Systems New eXperience	
HÚ	hlubinné úložiště	
kN/m ²	kilonewton na metr čtverečný	
kN/m ³	kilonewton na metr krychlový	
m	metr je základní jednotka délky v mezinárodní soustavě jednotek SI	
mm	milimetr je jednotka délky odpovídající tisícině metru	
MPa	megapascal	
m/s	metr za sekundu	
obr.	obrázek	
pH	potenciál od hydrogen (potenciál vodíku)	[-]
RAO	Radioaktivní odpad	
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost	
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů	
tzv.	takzvaný	

3D	trojrozměrný
----	--------------

1. Úvod do problematiky těsnících zátek hlubinného úložiště radioaktivních odpadů

1.1 Charakteristika radioaktivních odpadů

Jaderná energie má své nezastupitelné místo v celé řadě lidských činností. Její využívání je spojeno se vznikem radioaktivních odpadů (dále jen RAO), které mohou způsobit ohrožení obyvatel nebo životního prostředí. S radioaktivními odpady musíme nakládat bezpečně, jelikož jsou předmětem mnoha výzkumů, které se neustále vyvíjejí.

RAO nelze zbavit jejich nebezpečných vlastností, proto musí být na dostatečnou dobu odděleny od biosféry. To umožňuje úložiště RAO, která jsou nejvhodnějším řešením konečné likvidace.

RAO vznikají při veškeré lidské činnosti. Jedná se o všechny nevyužitelné materiály v pevném, kapalném nebo plynném skupenství, které obsahují takové množství radionuklidů, že je běžným způsobem nelze likvidovat. Proto musí být zneškodněny nebo uloženy zcela jinými způsoby. RAO postupně ztrácí svoji nebezpečnou vlastnost – radioaktivitu, která závisí na poločasu rozpadu. Poté se postupně přemění na prvky neaktivní.

1.2 Původci radioaktivních odpadů v České republice

V České republice je několik set původců RAO. Někteří vyprodukují jen nezadatelné množství nízkoaktivních odpadů, jiné naopak větší množství vysoceaktivních odpadů. Musí se brát ohled na to, jak nebezpečný odpad v daném odvětví vzniká, nejen tedy jeho množství. Se spuštěním jaderných elektráren došlo k velkému vzrůstu objemu a stupně radioaktivity RAO. Bylo nutné zaměřit se na jeho likvidaci nebo alespoň na jeho bezpečné uložení. Původci radioaktivních odpadů:

- ČEZ, a.s.,
- Ústav jaderných paliv Praha, a.s.,
- VÚHŽ, a.s.,
- ZAM – servis, s.r.o.,
- VF, a.s.,
- Jaderná elektrárna Temelín,
- Jaderná elektrárna Dukovany,
- Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.,

- zdravotnictví,
- průmysl,
- vzdělávací instituce.[1]

1.3 Členění radioaktivních odpadů

„Podle české legislativy se RAO dělí na kapalné, plynné a pevné. Kapalné a plynné odpady nespádají do působnosti Správy úložišť radioaktivních odpadů, ukládat tyto typy odpadů není povoleno. Pevné odpady jsou dále děleny podle aktivity.“[2] Dále se RAO dělí na lisovatelné a nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné. Podle chemickým vlastností jsou anorganické a organické i kyselé, neutrální a podobně. Jeden z nejdůležitějších způsobů dělení je dle místa vzniku:

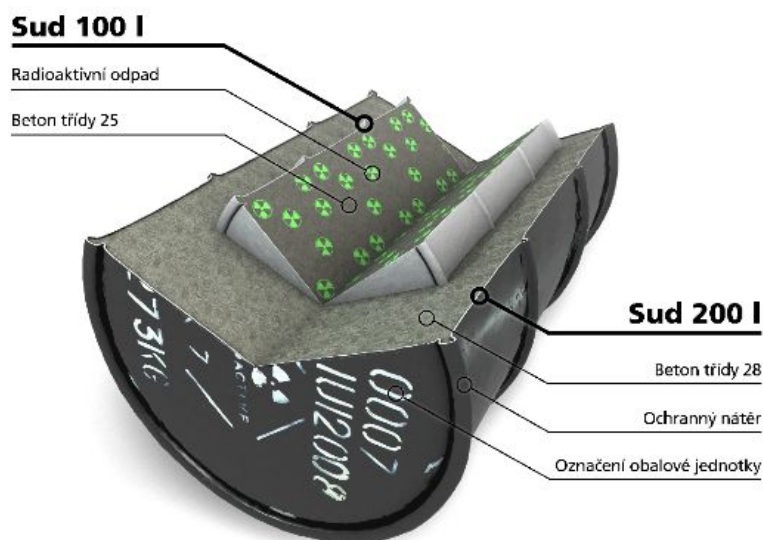
- **RAO vznikající v jaderné energetice** – odpady, které vznikají při těžbě a zpracování radioaktivních surovin, reaktorové odpady, odpady z vyřazování jaderných zařízení nebo odpady z přepracování vyhořelého paliva (např. různé kapaliny, kaly, materiály a předměty, které byly v kontaktu s radionuklidy nebo vyhořelé jaderné palivo).
- **Institucionální odpady** – vznikají v průmyslových či medicínských zařízeních nebo výzkumných střediscích. Největší množství produkuje ÚJV Řež, a.s., která je zároveň největším zpracovatelem (např. znečištěné pracovní oděvy a látky, staré měřicí přístroje).
- **Nízkoaktivní odpady** – „definován jako odpad, jehož aktivita je vyšší, než jsou uvolňovací úrovně, ale který současně obsahuje omezené množství dlouhodobých radionuklidů.“ [2]
- **Středněaktivní odpady** – „je považován odpad, který obsahuje významné množství dlouhodobých radionuklidů, a proto vyžaduje vyšší stupeň izolace od okolního prostředí než nízkoaktivní odpad.“[2]
- **Vysoceaktivní odpad** – „u něhož musí být při skladování a ukládání zohledněno uvolňování tepla z přeměny v něm obsažených radionuklidů. Vzniká jich jen velice malé množství a jsou skladovány pod dohledem v zařízeních k tomu určených. Tyto odpady budou společně s vyhořelým jaderným palivem uloženy v hlubinném úložišti.“[2]

1.4 Ukládání radioaktivních odpadů

1.4.1 Ukládání nízko a středněaktivních odpadů

„Vzniklý radioaktivní odpad je nutno roztřídit, zpracovat a upravit tak, aby jej bylo možné bezpečně uložit, tj. trvale oddělit od životního prostředí. Kapalné odpady je nutné zahustit a zpevnit vhodným ztužidlem (cement, bitumen, aluminosilikát, skleněná matrice). Pevné odpady mohou být lisovány. Odpad je vložen do 100 l nerezového sudu a ten do 200 l sudu. Meziprostor mezi sudy je vyplněn betonem a poté je sud uzavřen víkem, opatřen speciálním nátěrem a označen. Takto upravený sud je nazýván obalovým souborem.“[3]

„Obal, ve kterém je odpad uložen a další jeho kriteria jsou přesně stanoveny limity a podmínkami pro provoz jednotlivých úložišť. Vlastnostem ukládaného odpadu musí vyhovět i samostatný provoz, aby byl považován za bezpečný. Limity a podmínky bezpečného provozu jsou schvalovány Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a pravidelně aktualizovány na základě bezpečnostních rozborů. Odpady nesmí obsahovat volné kapaliny, výbušniny ani nebezpečné látky. Provoz úložišť je několikrát ročně kontrolován inspektory ze SÚJB nebo také inspektory z báňských úřadů.“ [3]



Obrázek 1: Uložení odpadu v sudu [3]

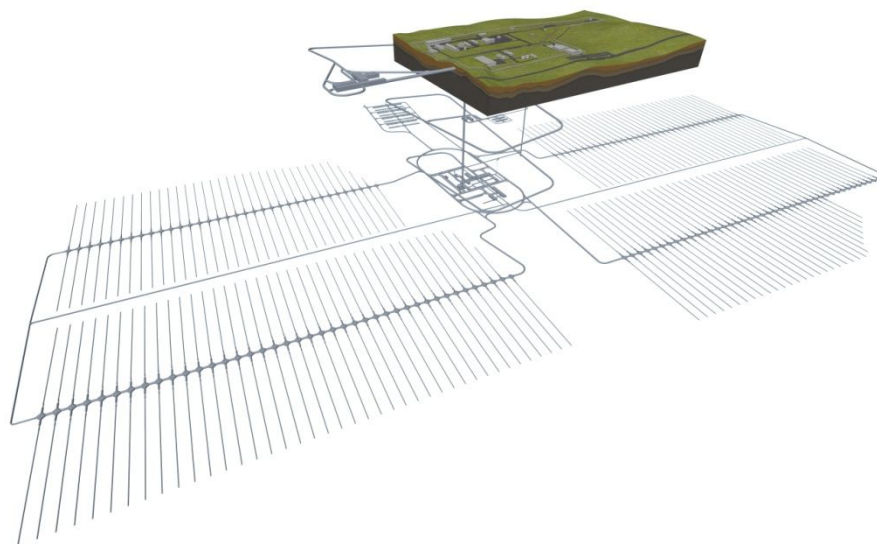
1.4.2 Ukládání vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva

„Vyhořelé jaderné palivo je v současné době bezpečně skladováno v meziskladech v areálu jaderných elektráren. Vlastníkem jaderného paliva je provozovatel a to až do doby, kdy jej vlastník nebo Státní úřad pro jadernou bezpečnost prohlásí za odpad. Vlastníkem odpadu se stává v tu chvíli stát, který prostřednictvím SÚRAO zajistí jeho bezpečné uložení.“[4]

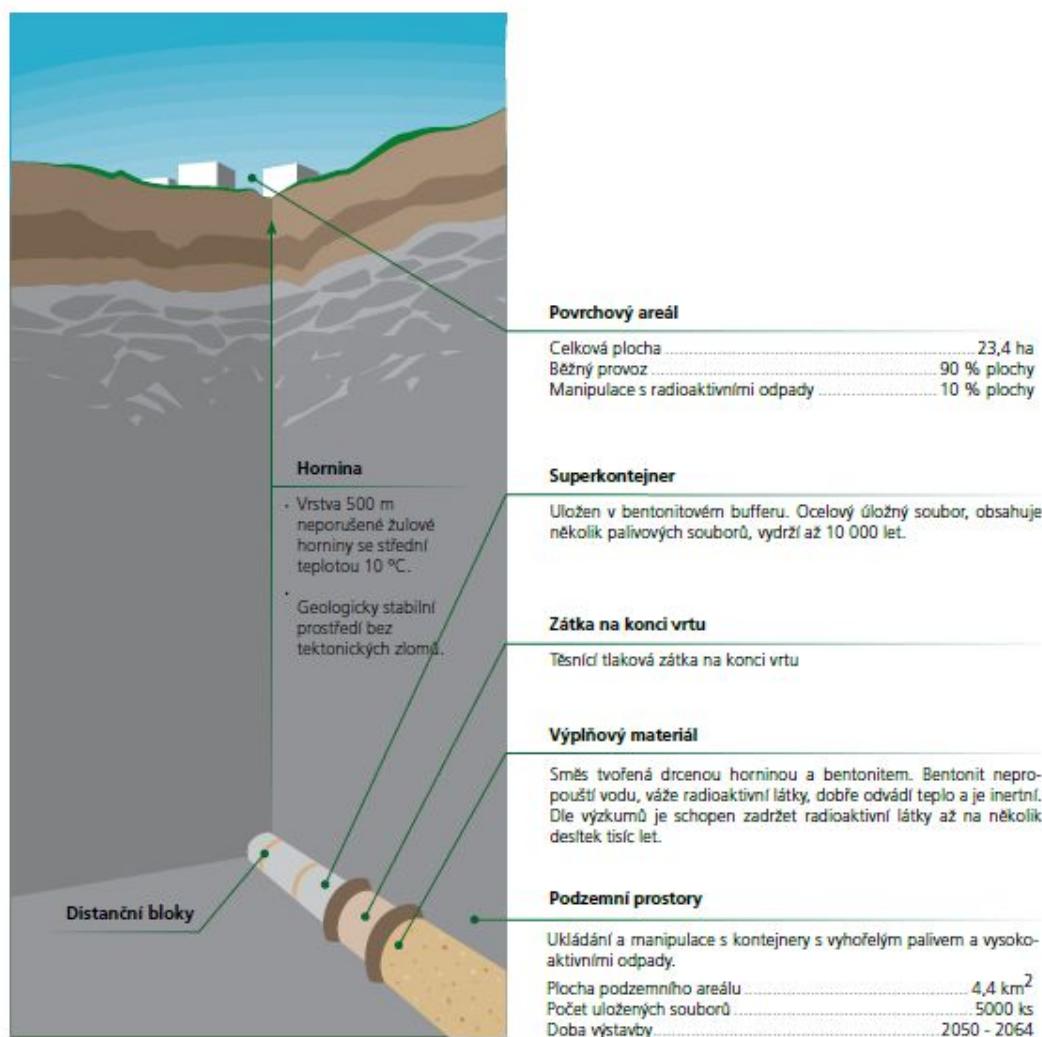
Za nejbezpečnější způsob likvidace těchto odpadů se považuje uložení do hlubinného úložiště. Jeho základní bariérou je ukládací obalový soubor, druhou bariérou jsou nepropustné těsnící materiály (buffer) a třetí bariéru tvoří stabilní horninové prostředí cca 500 metrů pod povrchem země. Podle geologických možností každého státu vznikla modifikovaná technická řešení hlubinného úložiště, které záleží na geologických možnostech každého státu, tedy dostatečných objemů hostitelské horniny (např. grafitické horniny, jílové nebo solné formace) a legislativních požadavků. [4]

1.5 Hlubinné úložiště

„Hlubinné úložiště je zařízení, kde jsou vysokoaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo bezpečně uloženy a izolovány od životního prostředí po desítky až stovky tisíc let. To je možné díky tzv. multibarierovému systému, který se skládá jak z přírodní bariéry (horninový masiv, který je stabilní již několik milionů let) tak i z technických bariér, např. ukládacího kontejneru. Zde je možné skladování vysokoaktivních odpadů, ať už z jaderných elektráren nebo z průmyslu v povrchovém zařízení. Výhody hlubinného úložiště spočívají v jeho bezpečnosti, technické realizovatelnosti a ekonomické přijatelnosti.“ [5]



„Podmínkou výstavby navrženého technického řešení je prokázání bezpečnosti, a to nejen provozní, ale především dlouhodobé, která se vzhledem k charakteru uložených odpadů pohybuje v řádech statisíců let. Při hodnocení dlouhodobé bezpečnosti (po uzavření úložiště) je třeba zvažovat i velmi málo pravděpodobné procesy, události či nehody, které mohou nastat v horizontu statisíců let.“ [6]



Obrázek 3: Řez hlubinným úložištěm [7]

1.6 Konstrukční řešení hlubinného úložiště

„Hlubinné úložiště bude tvořeno dvěma areály – povrchovým a podzemním. V povrchovém areálu budou objekty nutné pro příjem a zabezpečení provozu ukládání vyhořelého jaderného paliva a radioaktivních odpadů, dále objekty pro zajištění pobytu pracovníků, administrativu a rovněž objekty zajišťující provoz povrchového i podzemního areálu (komunikace, inženýrské sítě, fyzická ochrana areálů atd.). Povrchový areál bude napojen na silniční a železniční infrastrukturu.“[8]

„Podzemní areál budou tvořit různé typy důlních děl - jámy, komíny, úklonné chodby, horizontální chodby, kaverny i chodby malých průřezů. Volba vhodného technologického postupu bude ovlivněna nejen typem důlního díla, ale též kvalitou horninového masivu, zejména jeho rozpukáním, homogenitou a mocností nadloží.“ [8]

1.7 Těsnící zátka

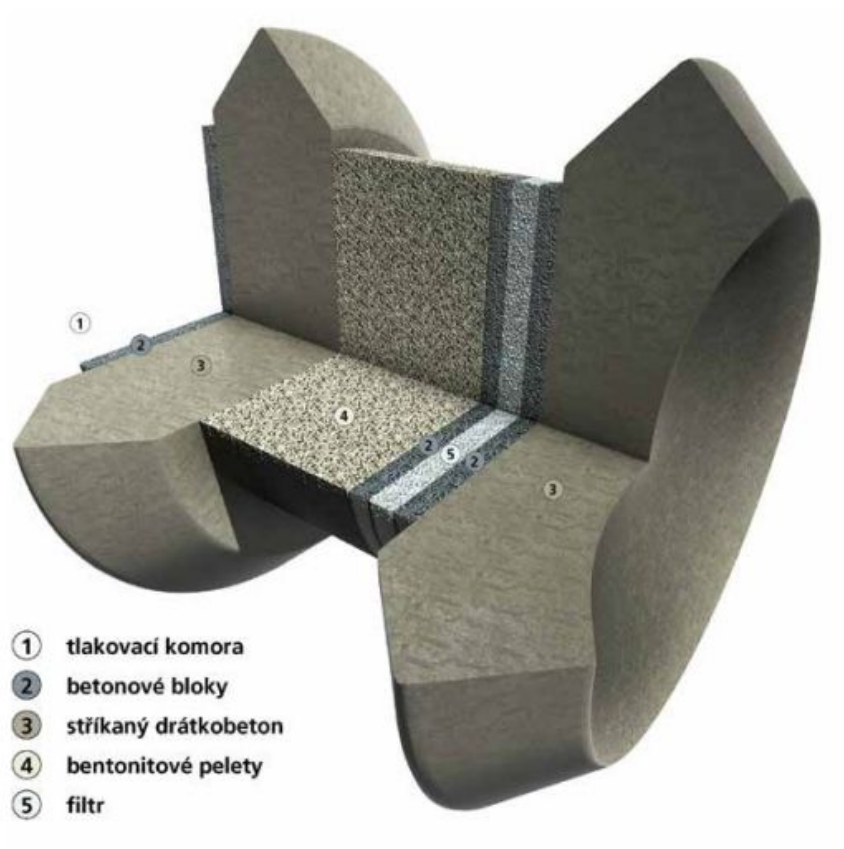
Těsnící zátka v hlubinném úložišti bude oddělovat již zaplněné prostory od prostor nezaplňných. Konstrukce zátek je nutné navrhnout a také ověřit technologické postupy a materiály pro jejich výstavbu. Jejich hlavním úkolem je bezpečné utěsnění a uzavření jednotlivých ukládacích prostor nejen po celou dobu provozu úložiště, ale i po jeho trvalém uložení. Zátka musí být konstruována, aby odolávala vysokým tlakům vznikajícím v důsledku hydrostatického tlaku a objemových změn inženýrských bariér.

Experiment těsnící zátka je realizován v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef v České republice a je jedním z významných mezinárodních projektů, na kterém se podílí SÚRAO (Správa úložišť radioaktivních odpadů) a také DOPAS (Demonstration of Plugs and Seals).“ DOPAD je mezinárodní projekt, jehož cílem je navrhnout využití systému zátek v hlubinném úložišti, vytvořit detailní design a ověřit vlastnosti používaných materiálů, otestovat stavební technologie a realizovat experimenty v reálném geologickém prostředí, které ověřují jejich funkčnost.“ [7]

Konstrukce zátky

Experiment EPSP („Experimental Preassure and Sealing Plug“) se skládá z následujících částí.

- **Tlakovací komora** „je dutina, do které je přiváděno tlakovací médium pro zatěžování experimentu. Prostor tlakovací komory je upraven tak, aby její objem byl co nejmenší při zachování požadované funkčnosti celoplošného namáhání zátky. Tím se minimalizovala balastní zátěž experimentu. Tlakovací komora je propojena s technologickým centrem pomocí čtyř vystrojených vrtů.“[10]
- **Betonové separační zdi** „jsou pomocné konstrukce nutné pro výstavbu zátek. První slouží k uzavření tlakovací komory a jako podklad pro nástřik vnitřní zátky. Druhá odděluje filtr od bentonitového těsnění a slouží také pro zajištění stability těsnícího jádra v průběhu výstavby. Třetí uzavírá filtr a slouží zároveň jako podklad pro nástřik vnější zátky. Všechny zdi byly stavěny jako propustné, aby neovlivňovaly proudění v experimentu.“[10]
- **Vnitřní betonová zátka** - „má dvě základní funkce – statickou a těsnící. Má zajistit stabilitu EPSP, omezit přítok vody do těsnění a tím zabránit jeho rozplavení. Byla vystavěna ze stříkaného betonu se sníženým pH a skelnými vlákny.“[10]
- **Bentonitové těsnění** - „je hlavním těsnícím prvkem EPSP. Je postaveno z bentonitu B75 ve formě hutněných či stříkaných pelet.“
- **Filtr** - „je určen pro sběr vody, kterou by nezadrželo bentonitové těsnění. Je zároveň navržen tak, aby se dal použít jako alternativní tlakovací komora.“[10]
- **Vnější betonová zátka** - „je identická se zátkou vnitřní. Jejím hlavním účelem je zajištění stability EPSP.“ [10]



Obrázek 4: Konstrukce zátky [7]

2. Charakteristika experimentální těsnící zátky ve štole Josef realizované v rámci projektu DOPAS, analýza získaných experimentálních výsledků

2.1 DOPAS

DOPAS („Demonstration Of Plugs And Seals“) je mezinárodní evropský výzkumný projekt zaměřený na ukládání vysoce radioaktivního odpadu. Projekt DOPAS, měl za úkol provést návrhy zátky, těsnění a následně provést její realizaci v plném rozsahu. Experimentální zátky jsou celkově čtyři, ty představují těsnění HÚ RAO. Zátky různých konceptů budou vystavěny v různých geologických podmínkách. Cílem je tedy prokázat, že se současně dostupnými prostředky jsme schopni tyto zátky postavit a dodržet jejich stanovené parametry. Projekt se zabývá důkladným popisem hydraulických a mechanických vlastností materiálu použitého v experimentech. Vývoje těsnícího zařízení pro HÚ se účastní čtrnáct organizací (organizace zodpovědné za výstavbu HÚ a výzkumní instituce podílející se na výstavbě HÚ) nakládajících s RAO ze sedmi evropských zemí (Česká Republika, Finsko, Francie, Holandsko, Německo, Švédsko a Velká Británie). Koordinátorem projektu je finská společnost Posiva. Projekt financovaný Evropskou Unií byl spuštěn v září 2012 a byl ukončen v srpnu 2016.

Experimentální zátky byly vystaveny ve výzkumných centrech zástupců z Finska, Francie, České Republiky a Švédska. Experimenty vystavené v rámci projektu DOPAS, jsou:

- Experiment 1. FSS („Full Scale Seal Experiment“) – Francie
- Experiment 2. EPSP („Experiment Pressure and Sealing Plug“) – Česká Republika
- Experiment 3. DOMPLU („Done Plug Experiment“) – Švédsko
- Experiment 4. POPLU („Posiva Plug Experiment“) – Finsko

Výstavba experimentálních zátek ve výzkumných centrech těchto zemí byla zvolena pro různorodost geologických prostředí.

Výsledky pomohou upravit požadavky celého projektu, informují širší společenství o nakládání s RAO.

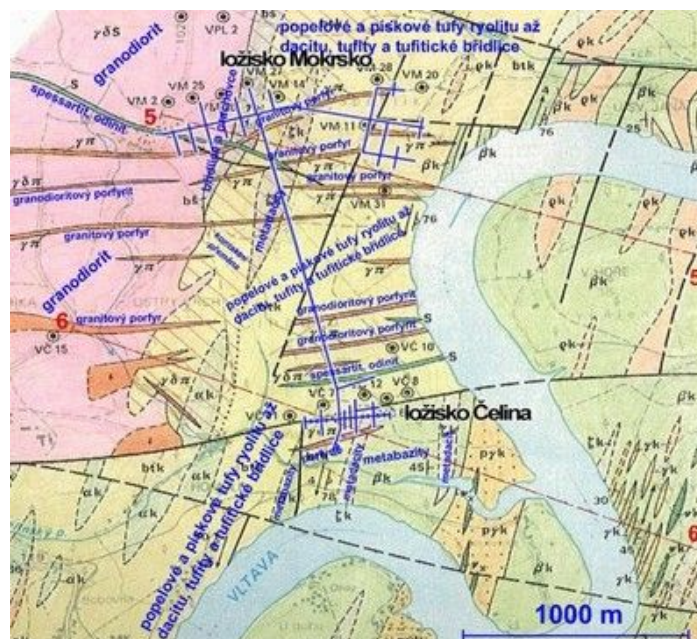
2.2 EPSP experiment

V rámci evropského projektu DOPAS, proběhla realizace experimentu EPSP („Experimental Preassure and Sealing Plug“) ve štolě Josef (obr. 5,6) a na pracovišti centra experimentální geotechniky Českého vysokého učení technického v Praze. Jedná se o český experiment simulující ukládání vysoce radioaktivních odpadů v HÚ. To se skládá z přístupových štol s rozrážkami, ve kterých jsou uloženy kontejnery s vyhořelým palivem. Rozrážky a přístupové štoly jsou celé uzavřeny tzv. zátkou. Právě takováto zátka byla v rámci EPSP experimentu ve štolě Josef realizována.

Primárním cílem experimentu bylo testování materiálu a technologie použité při realizaci zátky. Hlavním cílem není podrobný návrh, ale pouze demonstrace technické proveditelnosti a funkčnosti samotné zátky. Experiment primárně využívá materiálů a technologií dostupných v České Republice. Centrum experimentální geotechniky ČVUT v Praze navrhlo technické řešení zátky (obr. 7). Zátka experimentu byla navržena jako prototyp pro české úložiště radioaktivních odpadů. Zátka je navržena jako vícevrstvý systém. Stabilitu celého systému zajišťují dva mohutné betonové bloky, mezi kterými je úsek vyplněn jílovým materiálem (bentonitem).

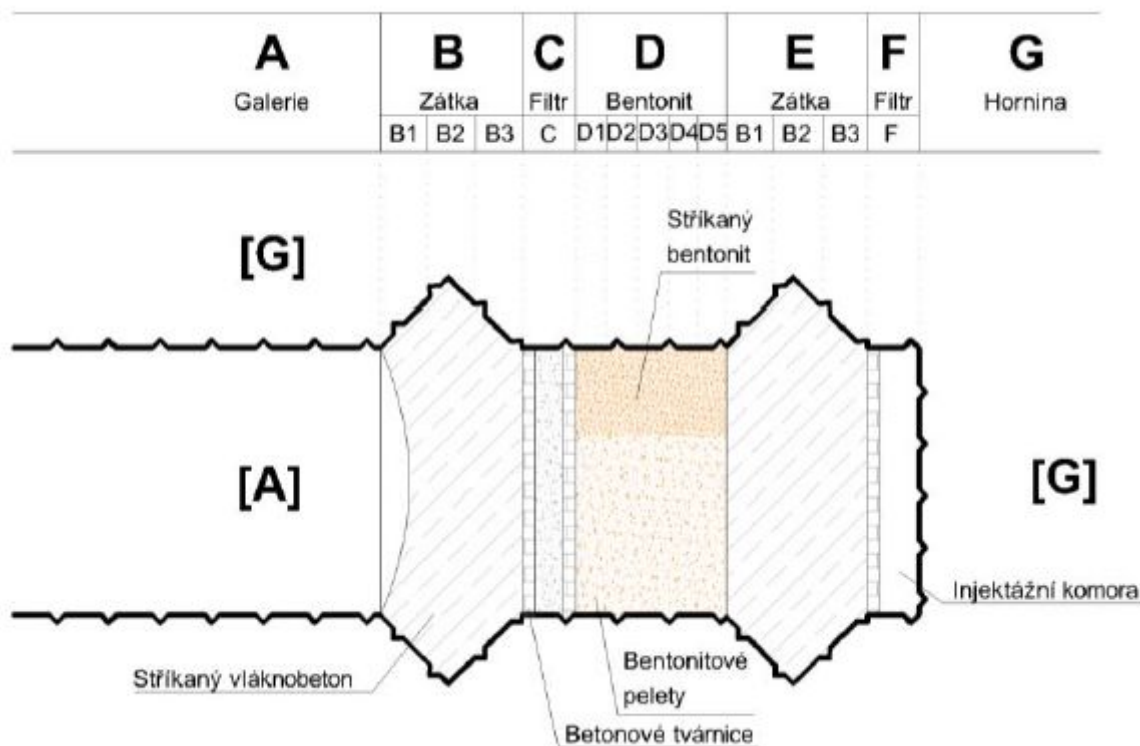


Obrázek 5: Schéma štol Josef



Obrázek 6: Geologická mapa Podzemní laboratoře Josef [11]

Řešení se skládá z několika vrstev. Po vyražení výrub bude postavena tlaková (injektažní) komora. Následovat bude výstavba betonového segmentu zhotoveného ze stříkaného vláknobetonu z cementu s nízkou hodnotou pH (vnitřní betonová zátka – E s filtrem – F). Následuje zóna zhutněných bentonitových pelet (bentonit – D) uzavřená filtrem z kameniva mezi betonovými tvárnici (filtr – C). Celé těleso zátky bude uzavřeno druhým vlákno-betonovým segmentem (vnější betonová zátka – B).



Obrázek 7: Schéma EPSP experimentu [10]

„Experiment EPSP, který je rozdělen do 4 etap, realizovalo české sdružení partnerů (SÚRAO, ČVUT a ÚJV Řež, a.s.).

První etapa byla zaměřena především na nezbytné laboratorní ověření vhodnosti materiálů použitých pro konstrukci zátky; zejména bentonitu a betonové směsi, na jejichž kvalitu a detailní charakteristiku byl kladen při návrhu zátky největší důraz.

Náplní druhé etapy byla samostatná stavba experimentu, která byla zahájena v roce 2013 injektážními a vrtnými pracemi v experimentální rozrážce M-SCH-Z/SP-59. Na tyto práce plynule naváže výstavba zátky včetně instrumentace celého experimentu a technologického zázemí.

Třetí etapou je tlakování sytíci médii, kdy bude zátka vstavena tlaku až 7 MPa. Po celou dobu bude probíhat kontinuální monitoring experimentu a technologie.

Poslední etapa výzkumu je zaměřena na vyhodnocení dat a poznatků získaných z insitu a laboratorních měření pomocí numerické analýzy a modelování. Výstupem je ověřování

provozní bezpečnosti konstrukčních prvků zátek v hlubinném úložišti a doporučení pro jejich budoucí realizaci.“ [9]

2.3 Charakteristika použitých materiálů

BETON

„Při přípravě experimentu EPSP bylo rozhodnuto, že bude použit stříkaný beton se sníženým pH a skelnými vlákny jako výztuží. Skelná vlákna byla zvolena místo drátků z důvodů snížení přítomnosti železa a vyloučení možnosti vzniku korozních produktů. Vlákná také slouží jako prevence proti vzniku trhlin. Snížení pH je požadováno z důvodu snížení dopadů výluhu na bentonit.,,

„Složení finální směsi bylo následující:

- cement: CEM II / B – M (S-LL) 42.5 N,
- kamenivo: 0-4 & 4-8 Dobřín,
- plastifikátor: SIKA 1035CZ,
- zpožďovač: SIKA VZ1,
- urychlovač: SIKA Sigunit L93 AF,
- microsilica: SIKA FUME,
- skelná vlákna: crack HP (Sklocement Beneš).“ [10]

„Poměr cementu a mikrosiliky byl přibližně 1:1.“ [10]

„Minimální pevnost vláknobetonu v tlaku je 30 MPa, pevnost v tahu 3 MPa a hydraulická vodivost menší než 10^{-10} m/s.“

„Mimo vlastní betonové zátky je beton použit i pro pomocné konstrukce – stěny ze ztraceného bednění a filtr. Zde je použit ve formě drenážního (mezerovitého) betonu tak, aby co nejméně ovlivňoval proudění uvnitř experimentu.“ [9]

„Významnou veličinou sledovanou u betonové směsi použité pro výstavbu zátky a pomocných konstrukcí je hodnota pH výluhu. Pro potřeby projektu je požadováno, aby veškerá použitá betonová směs měla snížené pH (pH výluhu < 11,7) z důvodu omezení nepříznivého působení na bentonit.“ [9]

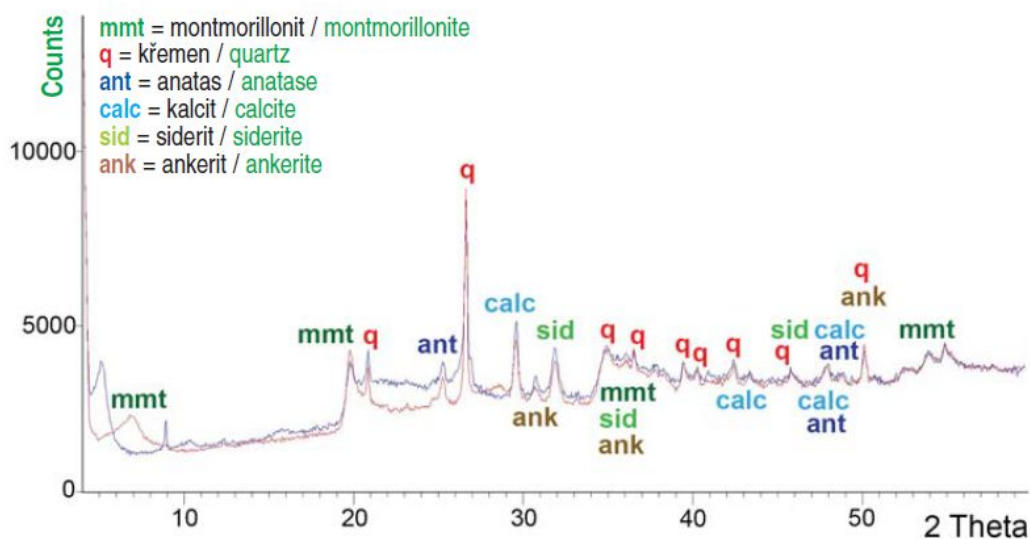
BENTONIT

„Materiál pro bentonitové těsnění byl vybrán na základě následujících požadavků:

- lokální materiál – materiál z ČR,
- přírodní neaktivovaný materiál,
- materiál musí splňovat požadavky na těsnění,
- materiál musí být homogenní,
- materiál musí být dostupný v dostatečném množství.“ [10]

„Na základě těchto požadavků byl vybrán komerční produkt B75. Jedná se o neaktivovaný Ca-Mg bentonit produkovaný společností Keramost a.s.“ [10]

Mineralogické a chemické složení bentonitu B 75_2013 je uvedeno na obr. 8 a 9.



Obrázek 8: RTG difrakční záznam B 75_2013 [10]

	hm. %
SiO ₂	49,83
Al ₂ O ₃	15,35
TiO ₂	2,82
Fe ₂ O ₃	10,9
FeO	3,74
MnO	0,09
MgO	2,88
CaO	2,01
Na ₂ O	0,67
K ₂ O	1,05
P ₂ O ₅	0,63
CO ₂	3,66

Obrázek 9: Silikátová analýza bentonitu B 75_2013 [10]

„Z geotechnického hlediska je bentonit charakterizován mezí tekutosti, bobtnacím tlakem a hydraulickou vodivostí. Mez tekutosti se pohybuje okolo 170 %. Bobtnací tlak a propustnost bentonitu jsou závislé na ρ_d (suché objemové hmotnosti materiálu). Bobtnací tlak se exponenciálně zvyšuje od 1 MPa do 8MPa pro materiál $\rho_d = 1,26 - 1,64 \text{ g/cm}^3$. Pro průměrné $\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$, kterou má bentonit uvnitř experimentu, dosahuje bobtnací tlak cca 2 MPa. Hydraulická vodivost pro stejné rozmezí $\rho_d = 1,26 - 1,64 \text{ g/cm}^3$ postupně klesá z 10^{-12} m/s až na 10^{-13} m/s .“ [9]

„Zvolený materiál nemohl být pro experiment použit v dodané práškové formě. Proto byla hledaná vhodná technologie pro výrobu pelet s vysokou objemovou hmotností. Ve spolupráci s potenciálním průmyslovými producenty bylo postupně otestováno několik technologií a vybrány dvě nejvhodnější, kdy bylo dosaženo požadovaných vlastností lisovaného bentonitu.“ [10]

„První z nich produkuje válcové pelety o průměru 12 mm a délce asi 40 mm. Tyto pelety byly použity pro většinu objemu těsnícího jádra experimentu EPSP (obr. 7). Druhá technologie produkuje pomocí válcového lisování nepravidelné pelety (obr. 8). Tyto pelety (resp. jejich vybrané zrnitostní frakce) byly použity pro technologii stříkaného jílu.“ [10]



Obrázek 10: Pelety B75 válcové [10]



Obrázek 11: Pelety B75 zlomkové [10]

INJEKTÁŽ

„Vzhledem ke kvalitě horninového masivu bylo nutno provést injektáž horniny v okolí experimentu. Materiál injektáže byl zvolen tak, aby byly zlepšeny pevnostní a hydraulické vlastnosti zeminy. Zároveň bylo požadováno, aby negativně neovlivnil prostředí URC Josef.“

„Jako základní materiál byla zvolena injektážní hmota na bázi polyuretanu, která má atest pro styk s pitnou vodou. Laboratorně bylo ověřeno, že nedochází k nežádoucí chemické interakci mezi injektážní hmotou, materiálem EPSP a horninovým masivem.“ [10]

FILTR

„Filtr slouží pro sběr případných průsaků vody skrz experiment. Nemá žádnou jinou funkci, proto na něj nebyly kladeny speciální nároky mimo jeho stálosti a nerozpustnosti. Z tohoto důvodu byl pro filtr zvolen inertní štěrk.“ [10]

2.4 Návrh a statické posouzení EPSP

„Součástí projektu DOPAS, byla numerická analýza pro ověření statického návrhu EPSP. Pro tuto analýzu byly vytvořeny dva hlavní modely. První – celkový model - zahrnoval kompletní EPSP včetně horniny, druhý se detailně zabýval jednou betonovou zátkou v kontaktu s horninou.“ [10]

„Tyto modely simulovaly jednotlivé kroky výstavby a následné zatěžování experimentu. Modely nezahrnovaly změny napjatosti v hornině vlivem prvotní ražby rozrážek. Tato ražba proběhla v období 1981 – 1991 a předpokládá se, že veškeré deformace od této výstavby jsou již uklidněné. Také nebylo počítáno s přítoky podzemní vody, neboť okolí experimentu bylo

zainjektováno. Vlastní zatížení od tlakovacího média bylo simulováno pomocí tlaku v tlakovací komoře.“ [10]

„Výpočty a posouzení bylo provedeno podle ČSN EN 1997 – 1 (Eurokód 7) – návrhový přístup 2. Byl použit software CESAR –LCPC pracující na bázi konečných prvků, který se specializuje na podzemní stavby. Modely zahrnovaly účinky vlastní tíhy, smrštění, tlakování z komory, bobtnacího tlaku a jejich kombinace. Výsledky modelů byly porovnány s pevností betonové zátky a horninového prostředí.“ [10]

„Výsledky statického posouzení ukázaly, že zvolený návrh EPSP vyhoví a EPSP je schopno odolat předpokládaným zatížením.“ [10]

2.5 Geotechnický monitoring

„Systém geotechnického kontrolního sledování je navržen jako nedílná součást provádění navržené technologické výstavby HÚ cyklickým způsobem, kterému se proto také říká observační metoda. Na přesnosti měření, způsobu provádění, včasném vyhodnocení a správné interpretaci závisí bezpečnost i ekonomika raženého podzemního díla. Správně interpretované výsledky měření jsou podkladem pro zařazení výrubu do technologických tříd výrubu, případně podkladem pro operativní návrh změny vyzbrojení výrubu dle skutečných podmínek na stavbě. Cíle tohoto sledování jsou:

- zjistit stav horninového masivu dotčeného výstavbou důlního díla,
- zjistit průběh změn tohoto stavu v čase,
- určit chování horninového masivu a navržené konstrukce na změny vyvolané výstavbou,
- ověřit na základě skutečných výsledků měření do jaké míry se shoduje prognóza se skutečnými geotechnickými podmínkami a tím skutečné zastoupení jednotlivých technologických tříd výrubu,
- s dostatečným předstihem identifikovat neočekávané geotechnické poměry jako podklad pro operativní návrh dodatečného zajištění výrubu,
- varovat včas před nebezpečím ztráty stability konstrukce a tím minimalizovat rizika spojená s výstavbou podzemního díla,
- včas poskytnout podklad pro úpravu schématu prvků zajišťující výrubu v příslušné technologické třídě ražby s cílem optimalizace technologického postupu, jak po stránce bezpečnosti, tak ekonomické.“ [12]

„Geotechnická měření během výstavby rozdělujeme na systém měření během samotné ražby podzemní části HÚ a na systém sledování deformací svahů stavebních jam, ve kterých jsou budovány portálové úseky.“ [12]

„Vzhledem k tomu, že se předpokládá ražba v nepříliš složitých podmínkách, není navržený systém kontrolního sledování komplikovaný a odpovídá obvyklému schématu v daných podmínkách.“ [12]

„Pro výstavbu podzemní části HÚ jsou navrženy tyto systémy kontrolního sledování:“

- geotechnické měření deformací výrubu během ražby,
- sledování přetvoření horninového masivu v okolí výrubu vícenásobnými tyčovými extenzometry osazenými z povrchu,
- geodetické sledování sedání povrchu pro zjištění průběhu poklesové kotliny a objemové ztráty horniny,
- geodetické sledování svahů v portálových úsecích budovaných v otevřené stavební jámě,
- kontrolní měření během ražby,
- měření deformací výrubu.“ [12]

CÍLE MONITORINGU

„Hlavním cílem monitoringu je zachytit procesy probíhající uvnitř každé části experimentu EPSP, a tím ověřit chování jednotlivých komponent a zároveň budovat bázi znalostí pro budoucí zátky v HÚ. Pro ty to účely byly identifikovány kritické procesy a klíčová místa uvnitř experimentu, na které se monitoring zaměřil.“ [10]

„Monitoring se zaměřuje zejména na sledování pohybu vody uvnitř experimentu a odezvu experimentu na tlakování. Pohyb vody je sledován pomocí množství a tlaku injektovaného média, výtoků, změn vody uvnitř bentonitu a sledování tlaku vody (pórový tlak) na klíčových místech experimentu.“ [10]

„Mechanická odezva experimentu je sledována pomocí deformačních čidel instalovaných do betonových zátek a pomocí měřících svorníků v horninovém masivu.“

„Změna teploty je monitorována v celém experimentu s hlavním důrazem na sledování vývinu hydratačního tepla uvnitř betonových zátek.“ [10]

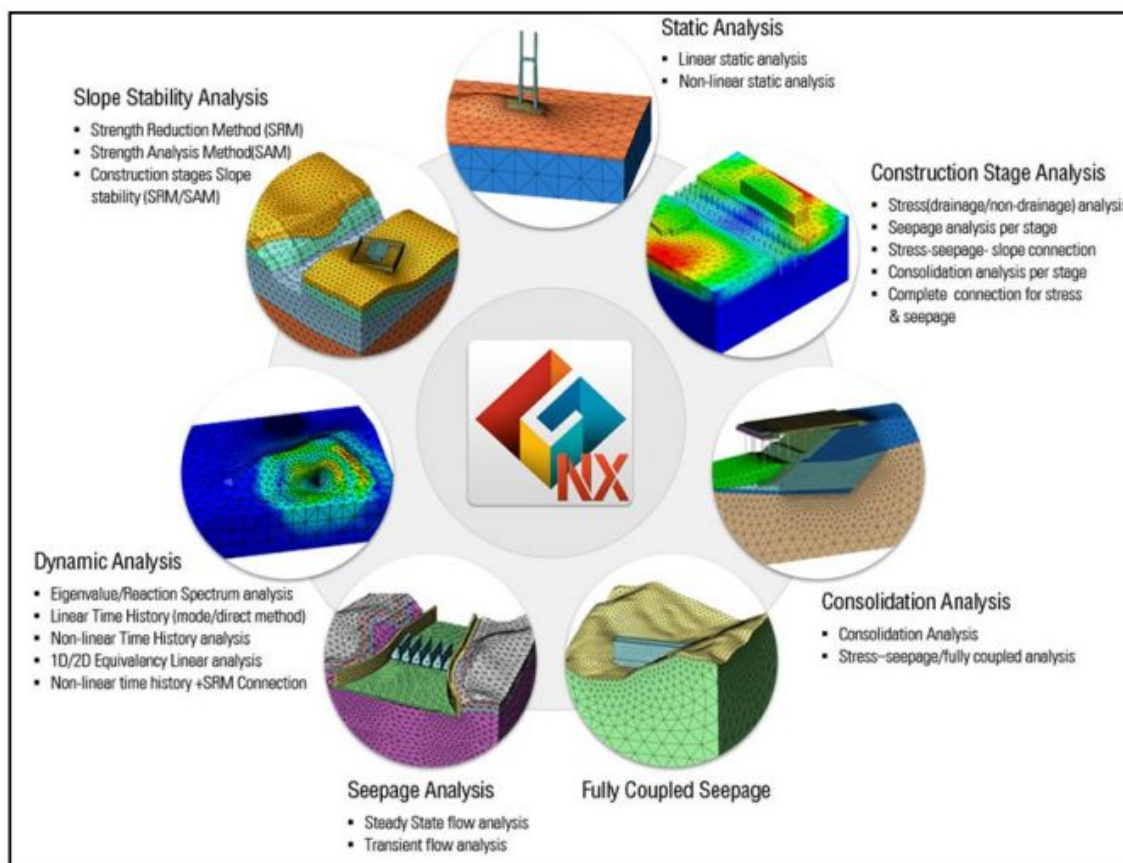
3. Realizace modelové parametrické studie těsnící zátky respektující požadavky budoucího hlubinného úložiště v ČR

Pro realizaci modelové parametrické studie těsnící zátky jsem zvolila softwarový geotechnický program MIDAS GTS NX (Geo – Technical analysis System New eXperience) pracující na základě numerické metody konečných prvků. Na základě získaných výsledků jsem provedla posouzení všech zátek. Celkově posouzeny 3 návrhy zátek, každá z nich je **zatížena z čelní strany tlakem** (u vnitřní konstrukce zátky) **2, 5 a 7 MPa**. Zároveň zátka musí odolat maximálnímu tlaku 7 MPa.

3.1 Softwarový program MIDAS GTS NX

„Tento softwarový program je schopen zpracovat celou řadu geotechnických konstrukcí včetně hlubokých základů, výkopů, komplexních tunelových systémů, analýzy průsaků, konsolidační analýzy, návrhu nábreží, dynamické analýzy a analýzy stability sklonu. GTS NX má také pokročilou uživatelsky přívětivou modelovací platformu, která umožňuje bezkonkurenční úroveň přesnosti a efektivity. GTS NX je vybaven specializovanými a jedinečnými funkcemi, které byly vyvinuty pro urychlení procesů modelování a analýzy. Díky těmto funkcím budeme schopni vytvářet vysoce kvalitní a optimální konstrukce s vyšší účinností.“ [13] Vzhledem k charakteru úlohy jsem volila **nelineární statickou analýzu**.

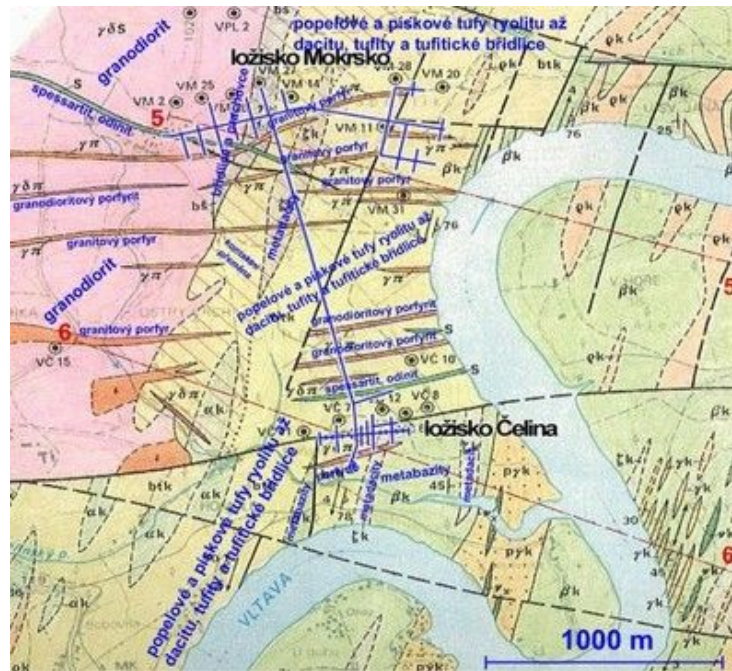
„GTS NX může v analýze uvažovat o veškeré nelinearitě (materiálu, geometrické a zatížení). Nelineární analýza může trvat dlouho pro složité nelineární systémy, protože jsou prováděny opakované výpočty.“[14]



Obrázek 12: Přehled geotechnických aplikací v softwaru MIDAS GTS NX [14]

3.2 Horninové prostředí

V konceptu hlubinného úložiště jsem navrhla tři těsnicí zátky - ty jsou navrženy v reálném horninovém prostředí granodioritu (žuly) – v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef, jenž se nachází asi 50 km jižně od Prahy u Slapské přehrady v oblasti Au-zrudnění Čelina-Mokrsko. Hostitelskou horninou jsou granitoidy sázavského typu variského stáří. Prostředí je geologicky stabilní bez tektonických zlomů. Hlubinné úložiště pro těsnicí zátky bude vybudováno v hloubce 500 m pod povrchem země, neporušené žulové horniny se střední teplotou 10 °, bývají i 300 – 1000 m pod povrchem země.



Obrázek 13: Geologie URC Josef [11]

GRANODIORIT = „světle šedá hlubinná magmatická hornina vznikla složením na přechodu mezi granitem a křemenným dioritem. Spolu s granitem je to nejrozšířenější hlubinná hornina.“ [15]

Obecné přetvárné vlastnosti horniny:

- modul pružnosti: 69 -70 GPa,
- objemová hmotnost: 2400 – 2800 kg/m³, [16]

Pevnost v tlaku: 100 – 150 MPa, tato hodnota je uvedena v tabulce 1. Pro výpočet úhlu vnitřního tření a soudržnosti jsem volila menší hodnotu 100 MPa. Kde napětí v tlaku a vtahu jsou tyto hodnoty:

$$\sigma_d = 100 \text{ MPa},$$

$$\sigma_t = 10 \text{ MPa}, \sigma_t - \text{napětí v tahu je } 1/10 \text{ napětí v tlaku}.$$

Tabulka 1: Pevnostní parametry horniny [28]

Pevnost hornin	Typy hornin (příklady)	Pevnost σ_c [MPa]	Poissonovo číslo ν	Objemová tíha horniny γ [kN/m ³]
Nejtvrdší horniny	nejtvrdší, celistvé, pevné a hutné křemence a čediče, jiné mimořádně tvrdé horniny	>150	0,1	28,00 - 30,00
Velmi tvrdé horniny	velmi tvrdé žulové horniny, křemité porfýry, velmi tvrdá žula, křemité břidlice, méně tvrdé křemence, nejtvrdší pískovce a vápence	100 - 150	0,15	26,00 - 27,00
Tvrdé horniny	žula hutná a celistvá, velmi tvrdé pískovce a vápence, křemité rudné žily, tvrdý slepenec, velmi tvrdé železné rudy, tvrdé vápence, méně tvrdé žuly, pevné pískovce, mramory, dolomity, kvz	80 - 100	0,2	25,00 - 26,00

Přetvárné a pevnostní vlastnosti horniny jsem zadávala do softwarového programu MIDAS GTS NX pro horninové prostředí. Byly to hodnoty pro modul pružnosti, objemová tíha, poissonovo číslo, úhel vnitřního tření a soudržnost.

- **Modul pružnosti: $E = 70$ GPa,**

hodnota modulu pružnosti převzata z tabulky materiálových charakteristik hornin,

- **objemová tíha: $\gamma = 26$ kN/m³,**

zvolila jsem nejmenší hodnotu objemové tíhy horniny z tabulky pevnostních vlastností v rozsahu 26 -27 kN/m³,

- **poissonovo číslo: $\nu = 0,15$,**

hodnota je uvedena v tabulkách pro velmi tvrdé horniny,

- **úhel vnitřního tření: $\varphi = 55^\circ$,**

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů:

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_d - \sigma_t}{\sigma_d + \sigma_t} = \arcsin \frac{100 - 10}{100 + 10} = 55^\circ$$

$$\sigma_d = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = 10 \text{ MPa, } \sigma_t - \text{napětí v tahu je } 1/10 \text{ napětí v tlaku}$$

- **soudržnost: 15,8 MPa,**

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů:

$$c = \tan \varphi \frac{\sigma_d * \sigma_t}{\sigma_d - \sigma_t} = \tan 55 \frac{100 * 10}{100 - 10} = 15,8 \text{ MPa}$$

kde

$$\sigma_d = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = 10 \text{ MPa}$$

$$\varphi = 55^\circ$$

3.3 Materiál těsnících zátek

Zátky, které budou umístěny v budoucím hlubinném úložišti radioaktivních odpadů, jsou navrženy z českých materiálů a technologií dostupných v České republice. Materiály jsou podobné experimentu EPSP, kde byly použity a ověřeny. Materiály jsem kombinovala pro všechny návrhy zátek. Všechny materiály jsou zadány v modelovém typu **Mohr-Coulomb**, u kterého jsou dány pevnostní parametry.

Pevnostní parametry jsem počítala pomocí vzorců:

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_d - \sigma_t}{\sigma_d + \sigma_t}$$
$$c = \tan \varphi \frac{\sigma_d * \sigma_t}{\sigma_d - \sigma_t}$$

kde φ - úhel vnitřního tření [°]

σ_d - napětí v tlaku [kPa]

σ_t - napětí v tahu [kPa]

c - soudržnost [kPa]

BETON

Beton je základní a nenahraditelná stavební hmota. Tomuto materiálu lze dát mnoho tvarů a podob, potom má velké množství využití nejen ve stavebnictví. V případě betonu dochází za posledních let ke znatelnému technologickému pokroku. Samotný beton je známý vysokou pevností v tlaku, ale nízkou pevností v tahu. Proto byl vyvinut beton s rozptýlenou výztuží, pod názvem vláknobeton.

„Vláknobeton je konstrukční stavební materiál. Má základní strukturu prostého betonu doplněnou vlákny, která ztužují strukturu kompozitu, a tím vylepšují některé jeho vlastnosti, jako např. **pevnost v tahu a pevnost v tahu za ohybu**. Vlákná mohou být z různých materiálů, různých tvarů a rozměrů.“ [17] Nejčastěji se jedná o ocelová, syntetická, skleněná či uhlíková vlákna nebo vlákna přírodního původu.

Vlákna do betonu:

- musí být v celém objemu betonu rovnoměrně rozptýlena,
- zlepšují schopnost betonu odolávat tahovým napětím,
- zlepšují houževnatost betonu,
- omezují negativní účinky objemových změn, zejména smršťování,
- zvyšují požární odolnost,
- jednotlivé druhy vláknem se liší materiálem, délkou a úpravou tvaru. [17]

Typické vlastnosti vláknobetonu jsou:

- houževnatost,
- odolný vůči tahovému napětí,
- negativní účinky objemových změn,
- zvyšují odolnost betonu vůči mrazu nebo v případě požáru,
- odolnost vůči nárazům,
- dynamická pevnost v ohybu.

Pro těsnící zátky jsem použila beton ve formě stříkaného betonu se snížených pH a skelnými vlákny jako výztuží. „Skelná vlákna byla zvolena místo drátků z důvodů snížení přítomnosti železa a vyloučení možnosti vzniku korozních produktů. Vlákna také slouží jako prevence proti vzniku trhlin. Snížení pH je požadováno z důvodu snížení dopadů výluhu na bentonit.“ [10]

Hodnoty přetvárných a pevnostních vlastností stříkaného vláknobetonu, které jsem použila pro výpočet:

- **modul pružnosti: $E = 18000 \text{ MPa}$**
hodnota pro stříkaný beton s výztuží,
- **objemová tíha: $\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$,**
- **poissonovo číslo: $\nu = 0,2$,**
hodnota uvedená v tabulkách pro poissonovo číslo materiálu pro beton,
- **napětí v tlaku: $\sigma_d = 45,45 \text{ MPa}$,**
průměrná hodnota z 59,2 a 51,4 MPa, tyto hodnoty byly uvedeny u betonu, který byl použit v experimentu EPSP,
- **napětí v tahu: $\sigma_t = 4,545 \text{ MPa}$,**

1/10 napětí v tlaku

- **úhel vnitřního tření: $\varphi = 55^\circ$,**

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů,

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_d - \sigma_t}{\sigma_d + \sigma_t} = \arcsin \frac{45,45 - 4,545}{45,45 + 4,545} = 55^\circ$$

- **Soudržnost: $c = 7,23 \text{ MPa}$,**

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů,

$$c = \tan \varphi \frac{\sigma_d * \sigma_t}{\sigma_d - \sigma_t} = \tan 55 \frac{45,45 * 4,545}{45,45 - 4,545} = 7,23 \text{ MPa}$$

BENTONIT

Bentonit je hornina vznikající zvětřováním mateční horniny z čediče. Je charakteristická vysokým obsahem **jílových nerostů**. Zároveň se jedná o jílovitou horninu, která vzniká alternací vulkanického popela, tufitů a tufů. Výsledný produkt je pak tvořen především minerály ze skupiny tektitů. Převládá zde montmorillonit, v pružném množství pak je obsažen illit a kaolinit a další minerály jako křemen, kalcit, plagioklas atd. Má velmi dobrou sorpční vlastnost a vysokou schopnost výměny kationtů. Je to plastická hornina s vlastnostmi, které umožňují bobtnat. Chemické i minerální složení je velmi proměnlivé a závislé na vzniku ložiska. Světové ložiskové zásoby bentonitu jsou odhadovány na více než 1400 mil. tun a počítá se s nálezy dalších lokalit. [18]

„Bentonitové těsnicí systémy využívají **schopnosti bentonitu zvětšovat svůj objem při kontaktu s vodou**. Výrazná molekulární expanze až o 300% objemu a zvýšeného tlaku zajistí zcela **spolehlivé utěsnění** vůči vodě.“ [19]

Hlavní předností bentonitů je schopnost minerálů ze skupiny tektitů přijímat vodu, případně organické roztoky, do své struktury mezi jednotlivé vrstvy a tím zvětšovat svůj objem. Tato vlastnost je využita v hlubinných úložištích, kde bude bentonit použit jako těsnicí materiál.

„Díky svým bobtnacím a nasávacím schopnostem je bentonit vhodný i pro sanaci nádrží a izolaci vodních děl. Těsnicí systémy na bázi bentonitu jsou elastické, a proto si zachovávají funkci i při pohybu stavebních prvků.“ [19]

Pro experiment EPSP byl zvolen bentonit B 75 české firmy Keramost, a.s. Bentonit B75 spadá pod skupinu neaktivovaných bentonitů. „Tuto skupinu tvoří sušené a mleté přírodní vápenato-hořečnaté bentonity pocházející převážně ze severočeských těžebních lokalit. BENTONIT 75 je jakostní neaktivovaný bentonit určený k přípravě formovacích směsí pro odlitky s krátkou dobou lití - do max. 15 sekund. Zároveň je vhodný pro ožívání výplňových formovacích směsí.“ [20]

„Další možnosti použití - flokulační zatěžkávací prostředek při čištění odpadních vod, pufr pro zvýšení nepropustnosti zemin, zadržování vláhy a živin v půdě, práškové hasivo, zahušťovadlo zemědělských odpadů a kejdy, plastifikační přísada malt, omítek a keramických hmot.“ [20]

U bentonitu jsem změnila vlastnosti smykové pevnosti podle hydratačního času 21 dní a to pro úhel vnitřního tření a soudržnost. Tyto hodnoty jsou převzaty z článku „The relationship between swelling and shear strength properties of bentonites.“

Modul pružnosti neboli Youngův modul je převzat z hodnot uvedených v článku [25,26], je nelineární a závisí na stupni saturaci. Já jsem volila stupeň saturace 20 %, z tohoto důvodu je hodnota modulu pružnosti $E = 140 \text{ MPa}$.

Tabulka 2: Vlastnosti bentonitu - poissonovo číslo [27]

	bentonite	rock_1	rock_2	fracture
$P_0 \text{ [MPa]}$	9.23	1.74	1.74	1.74
$\Lambda \text{ [1]}$	0.3	0.6	0.6	0.6
$k \text{ [m}^2\text{]}$	$9.5 \cdot 10^{-21}$	$9.0 \cdot 10^{-22}$	$9.0 \cdot 10^{-23}$	$2.5 \cdot 10^{-15}$
$n \text{ [1]}$	0.438	0.003	0.003	0.003
$\mu \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}

Hodnoty přetvárných a pevnostních vlastností bentonitu, které jsem použila pro výpočet:

- **modul pružnosti: $E = 140 \text{ MPa}$,**
hodnota převzata z článku [25, 26],
- **poissonovo číslo: $\nu = 0,3$,**
hodnota z tabulky 2,
- **úhel vnitřního tření: $\varphi = 12,27^\circ$,**
hodnota z tabulky 3 získaných parametrů pevnosti ve smyku,

- **soudržnost: $c = 6,32 \text{ kPa}$,**
hodnota z tabulky 3 získaných parametrů pevnosti ve smyku,
- **objemová tíha: $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$,**
hodnota je přepočítána z objemové hmotnosti pro suchou směs bentonitu 1400 kg/m^3 .
Pomocí vzorce: $\gamma = \rho * g$,

kde $\rho =$ objemová hmotnost $[\text{kg/m}^3]$
 $g =$ gravitační zrychlení v geotechnických výpočtech se tato hodnota zaokrouhluje na 10 m/s ;

$$\gamma = \rho * g = 1400 * 10 = 14 \text{ kN/m}^3$$

Tabulka 3: Smykové pevnostní parametry [21]

Hydration time	Peak parameters		Residual parameters	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
7 days	11.99	11.23	11.05	7.80
14 days	8.04	12.47	4.79	9.38
21 days	6.32	12.27	3.63	9.31

DRENÁŽNÍ BETON

Drenážní beton je průmyslově vyráběná suchá betonová směs, silně vodopustná, omezuje kapilární vztlakovost vody a omezuje sedání vlivem podmáčení, zmenšuje nadzvedávání konstrukcí vlivem mrazu.

Je to beton s pórovitou strukturou, který obsahuje právě tolik jemné malty, aby se kamenivo drcené na štěrk obalilo a bodově vzájemně propojilo. Mezi zrny zůstává dutý prostor, který se jemnou maltou nezaplní. U vrstev drenážního betonu tvoří obsah těchto dutých prostorů min. 15 objemových procent. [22]

Pro návrhy těsnících zátek jsem použila drenážní beton typu Drainbeton od české firmy Baunit.

Technické údaje:

- zrnitost: 8mm
- pevnost v tlaku (28 dní): $>16,0 \text{ N/mm}^2$
- sypaná objemová hmotnost: cca $1850 - 2000 \text{ kg/m}^3$ [23]

Hodnoty přetvárných a pevnostních vlastností drenážního betonu, použité pro výpočet:

- **modul pružnosti: $E = 13000 \text{ MPa}$,**

- **objemová tíha: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$,**

pro výpočet jsem použila průměrovou hodnotu objemové hmotnosti, kterou jsem zaokrouhlila na celou hodnotu a vypočítala pomocí vzorce,

$$\gamma = \rho * g,$$

kde ρ = objemová hmotnost $[\text{kg/m}^3]$ – 1900 kg/m^3

g = gravitační zrychlení v geotechnických výpočtech se tato hodnota zaokrouhluje na 10 m/s ;

$$\gamma = \rho * g = 1900 * 10 = 19 \text{ kN/m}^3$$

- **napětí v tlaku: $\sigma_d = 16 \text{ MPa}$,**

minimální hodnota,

- **napětí v tahu: $\sigma_t = 1,6 \text{ MPa}$,**

1/10 napětí v tlaku,

úhel vnitřního tření: $\varphi = 55^\circ$,

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů,

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_d - \sigma_t}{\sigma_d + \sigma_t} = \arcsin \frac{16 - 1,6}{16 + 1,6} = 55^\circ$$

- **soudržnost: $c = 2,53 \text{ MPa}$,**

hodnota vypočítána pomocí vzorce pevnostních parametrů.

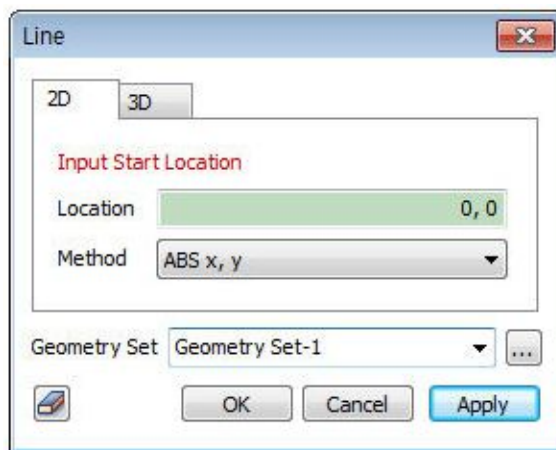
$$c = \tan \varphi \frac{\sigma_d * \sigma_t}{\sigma_d - \sigma_t} = \tan 55 \frac{16 * 1,6}{16 - 1,6} = 2,53 \text{ MPa}$$

3.4 Postup modelování těsnících zátek

Nejdříve jsem si promyslela návrhy těsnících zátek, které budou v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů. Vstupní parametry použité pro modely těsnících zátek byly převzaty z experimentu EPSP, projektu DOPAS. Chybějící charakteristiky materiálů a horninového prostředí byly čerpány z odborné literatury a internetových stránek, které byly doplněny k návrhům těsnící zátky.

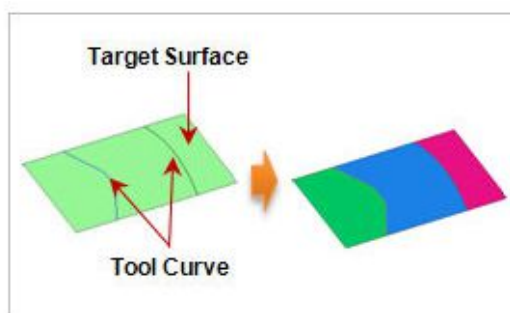
Jako první jsem si návrhy nakreslila ručně, abych viděla, jak bude vypadat jejich tvar a rozměry jednotlivých částí zátky. Celkový rozměr zátek je u všech tří návrhů stejný. Hranice modelu jsem volila tak, aby byly v dostatečné vzdálenosti od konstrukce zátky, aby nedocházelo k ovlivnění výpočtu okrajovými podmínkami matematického modelu. Vzdálenost od konstrukce zátky byla 12,2 m v horizontálním směru, ve vertikálním směru to byla hodnota 5,4 m.

Při vytváření samotného modelu byl využit softwarový program MIDAS GTS NX. Prvním krokem modelu byla záložka *Geometr*, ve které jsem volila *Line*. Vstupní počáteční body byly ve formě absolutní souřadnice (x, y). U koncového bodu jsem ze tří metod, zvolila metodu – absolutní hodnota souřadnic ve 2D v pracovní rovině. Pomocí ikony *Line* (obr. 14) jsem zadala souřadnice okrajových podmínek a samotné konstrukce zátky.



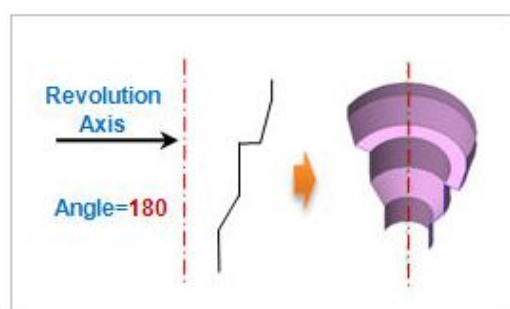
Obrázek 14: Nástroj – Line[30]

V dalším kroku bylo rozdělení jednotlivých částí modelu. Pro rozdělení modelu jsem použila ikonu *Divide – Surface*. Pro rozdělení jednotlivých částí modelu jsem volila způsob dvěma bodovými vektory. Klikla jsem na pracovní plochu a zadala počáteční a koncový bod, tímto způsobem jsem rozdělila všechny části modelu.



Obrázek 15: Nástroje Divide – Surface [30]

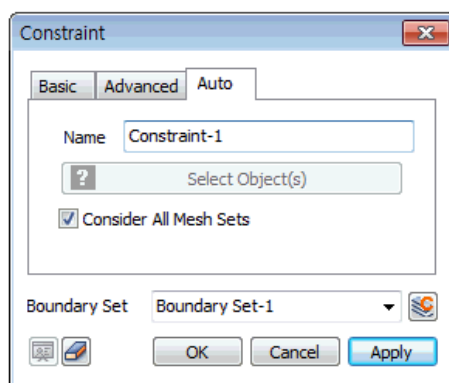
Další krokem bylo převedení modelu 2D do modelu 3D. To jsem provedla pomocí *Protrude – Revolve* (obr. 16). Vybrala jsem celou část modelu, otočila ji pomocí zvolené podélné osy x a vytvořila geometrie 3D modelu.



Obrázek 16: Nástroj Protrude – revolve [30]

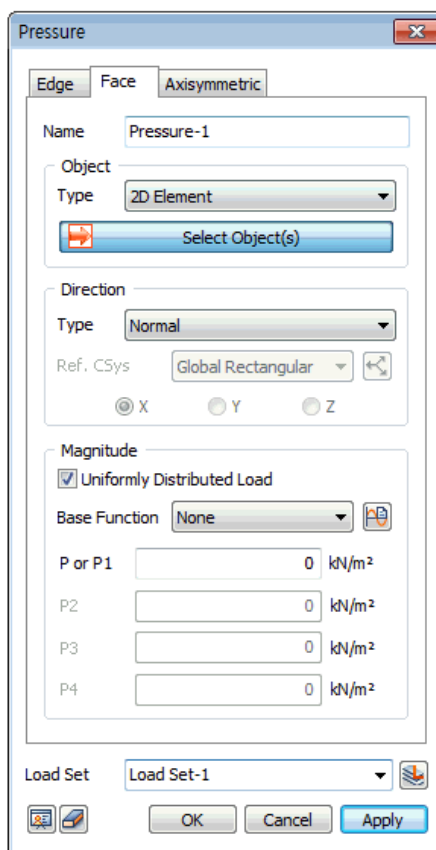
V záložce *Mesh – Material* jsem si přiřadila daný materiál a horninu s určenými hodnotami. K daným materiálům jsem přiřazovala modelový typ, modul pružnosti, objemovou tíhu, v případě nelineárních materiálů - soudržnost a úhel vnitřního tření. Modelové typy byly u materiálu dva, a to *Mohr-Coloumb* a *Elastic*. Poté jsem pomocí *Property* definovala pozemní (drenážní beton, bentonit, stříkaný vláknobeton a horninu – granodiorit) a strukturní vlastnosti. Tato funkce definuje dané vlastnosti každého materiálu při generování sítě nebo struktury sítě. U zeminy určuje, který materiál se má použít v dané části modelu. A pro struktury přidává velikost průřezu, tvar (tuhost) a vodorovné odstupy apod.

Pomocí funkce *Boundary – Constraint* (obr. 17) jsem vytvořila okrajové podmínky pomocí automatického vytváření vazebních podmínek. Základní podmínky pro obecnou analýzu napětí jsou nastaveny automaticky.



Obrázek 17: Dialogové okno pro nástroj – Constraint [30]

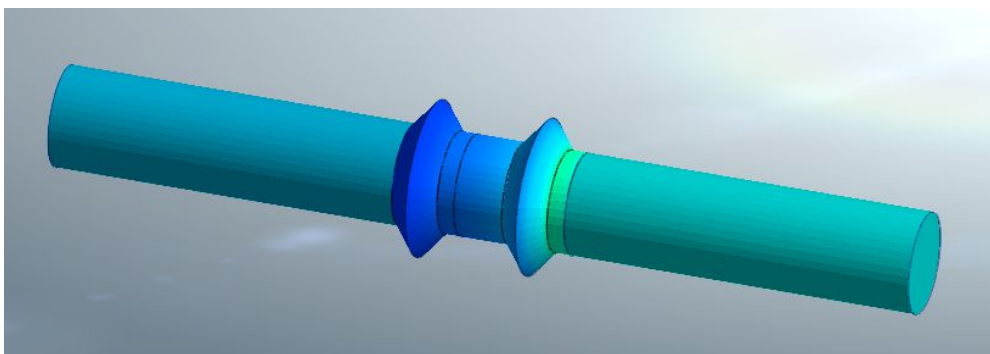
Dalším krokem bylo zadat tlak na zátku, který jsem zadávala pomocí funkce *Load – Pressure*. Tlak je vložen ve formě rozložené síly pro čelní stranu. Je použit na 3D prvky a normální směr. Zatížení je rovnoměrně rozloženo v zadní části těsnící zátky. Hodnoty tlaku jsou 2, 5 a 7 MPa.



Obrázek 18: Dialogové okno pro nástroj – Pressure [30]

Posledním krokem bylo nastavení analýzy výpočtu. To jsem provedla pomocí funkce *Analysis – General*, kde jsem si daný výpočet pojmenovala a zvolila metodu výpočtu *Nonlinear Static* (nelineární statická analýza popsána na začátku této kapitoly). V záložce *Analysis Case Model* jsem přidala okrajové podmínky, do záložky *Active Sets* tlak a odebrala prostor před a za zátkou, jelikož tam je volný prostor, se kterým nepočítáme.

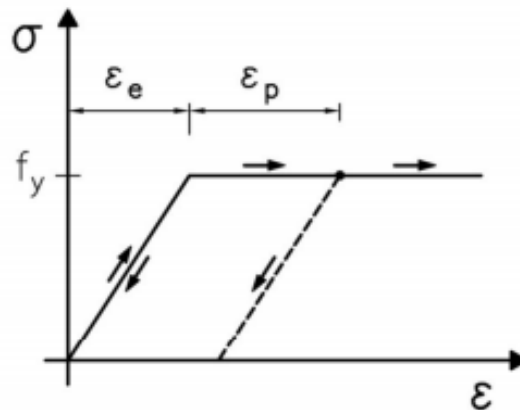
Nelineární statická analýza výpočtu byla zadána, byl spuštěn výpočet pomocí funkce *Solve*.



Obrázek 19: Konstrukce zátky s prostorem před a za zátkou

3.4.1 Mohr-Coloumbův modelový typ

Tento typ modelu popisuje chování zeminového prostředí. Pro tyto účely je využíván nejčastěji v geotechnické praxi. Jmenuje se Mohr-Coloumbův pružný, ideálně plastický model. Je definovaný elastoplastickým chováním, jak je znázorněno na obr. 20. Je založen na předpokladu lineárně pružného chování materiálu až do meze plasticity. Před dosažením meze plasticity dochází k vratným deformacím. Při překročení této hodnoty naopak probíhají plastické deformace při konstantním napětí.



Obrázek 20: Ideálně pružnoplastický model

kde

ε_e – elastické (pružné) přetvoření [-]

ε_p – plastické přetvoření [-]

f_y – napětí na mezi kluzu [MPa]

Hlavní nelineární parametry použité pro definici kritéria Mohr-Coloumbova jsou následující:

- Youngův modul pružnosti E [MPa],
- poissonovo číslo ν [kPa],
- soudržnost c [kPa],
- úhel vnitřního tření φ [°],
- úhel dilatace ψ [°].

K porušení zeminy dojde při dosažení napětí překračující smykovou pevnost materiálu τ . Tato lineární závislost smykové pevnosti představuje Mohr-Coloumbovou obalovou čáru pevnosti. Colombova přímka je obalovou čarou Mohrových kružnic, které znázorňují stav napjatosti na mezi porušení (obr. 21).

Coloumbův vzorec smykové pevnosti:

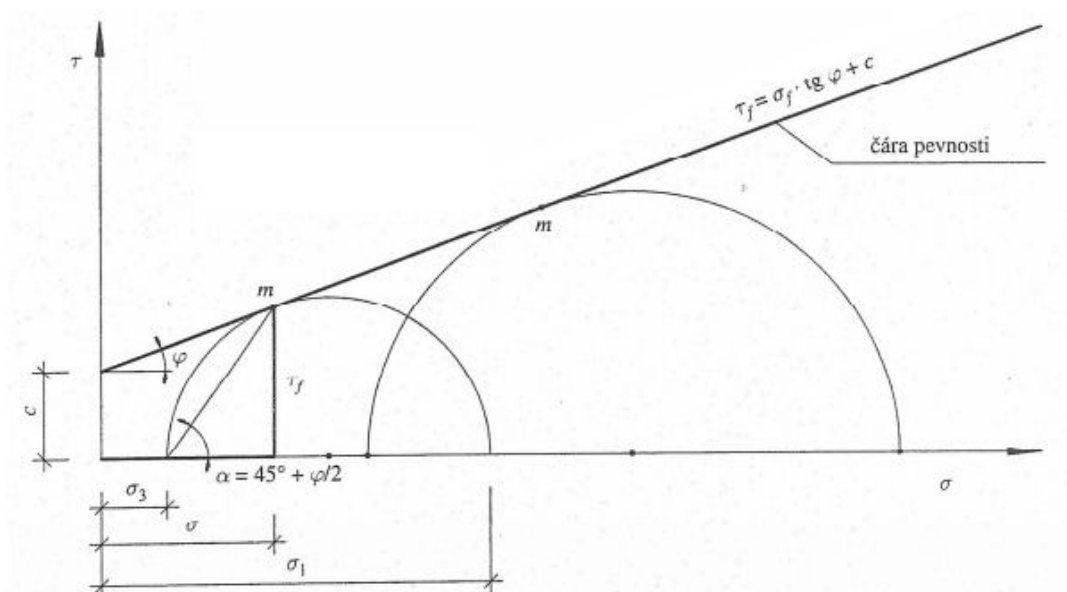
$$\tau = c + \operatorname{tg} \varphi \sigma$$

kde τ – tangenciální napětí v ploše – smyková pevnost [kPa]

σ – normálové napětí působící kolmo [kPa]

c – soudržnost zeminy [kPa]

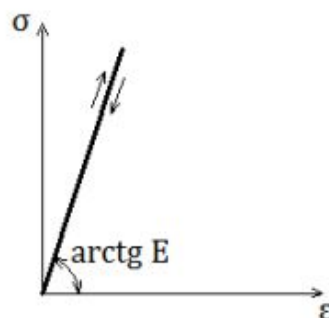
φ – úhel vnitřního tření zeminy [°]



Obrázek 21: Mohr-Coloumbova obálka porušení

3.4.2 Elastický (pružný) modelový typ

Hlavní znakem elastického chování je lineární závislost mezi napětím a deformací nezávisle na tom jestli, těleso zatěžujeme nebo odlehčujeme. Nevzniká zde žádný rozptyl energie. Po odlehčení vnitřní napětí i deformace vymizí. U lineárního modelu pružnosti, je deformace přímo úměrné napětí. Konstanty jsou modul pružnosti E a poměrného prodloužení ε (obr. 22).



Obrázek 22: Lineárně elastické (pružné) chování

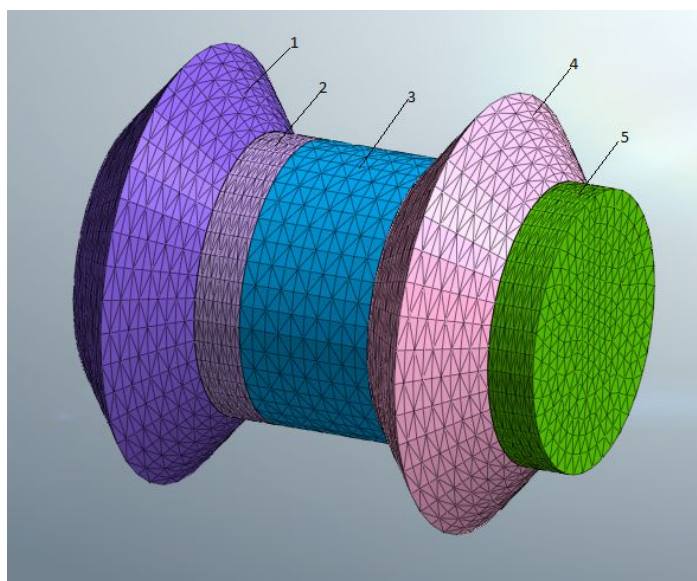
Elasticita neboli pružnost je schopnost látek deformovat se vratně. Přestane-li síla působit, vrací se elastické těleso téměř okamžitě do původního stavu.

3.5 Návrhy těsnících zátek

3.5.1 1. návrh těsnící zátky

Pro první návrh zátky jsem zvolila návrh zátky z experimentu EPSP od projektu DOPAS. Skladba zátky zůstala stejná, kromě filtru a tlakovací komory, které jsem nahradila drenážním betonem. Zátka je navržena ze stříkaného vláknobetonu, drenážního betonu a bentonitu.

Hlavní části zátky jsou tlakovací komora, vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu, bentonitové těsnění, část filtru nahrazena drenážním betonem, vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu a horninové prostředí složené z granodioritu viz obr. 23.



Obrázek 23: 1. návrh těsnící zátky

1 - vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu

2 – stěna z drenážního betonu

3 – bentonitové těsnění

4 – vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu

5 – tlakovací komora z drenážního betonu

Tlakovací komora je umístěná u čelby. Tlakovací komora je uzavřena stěnou z drenážního betonu, která slouží jako ztracené bednění pro vnitřní část zátky ze stříkaného vláknobetonu – jedna z hlavních částí.

Vnitřní zátka musí splňovat dvě základní funkce, a to statickou a hydraulickou. Tzn. zajištění mechanické stability celého systému i za působení vysokého tlaku a současně omezení proudění zátkou tak, aby nedošlo k porušení bentonitového těsnění. Kolem vnitřní zátky je vytvořen límec ze stejného materiálu.

Bentonitové těsnění má za úkol hydraulicky oddělit a těsnit prostory před a za zátkou. Na něj navazuje stěna z drenážního betonu, která slouží jako podpora pro bentonitové těsnění a zároveň jako ztracené bednění pro vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu.

Vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu uzavírá celý návrh. Její konstrukce je stejná jako vnitřní zátka. Funkce této zátky je mechanická stabilizace celku.

3.5.2 2. návrh těsnící zátky

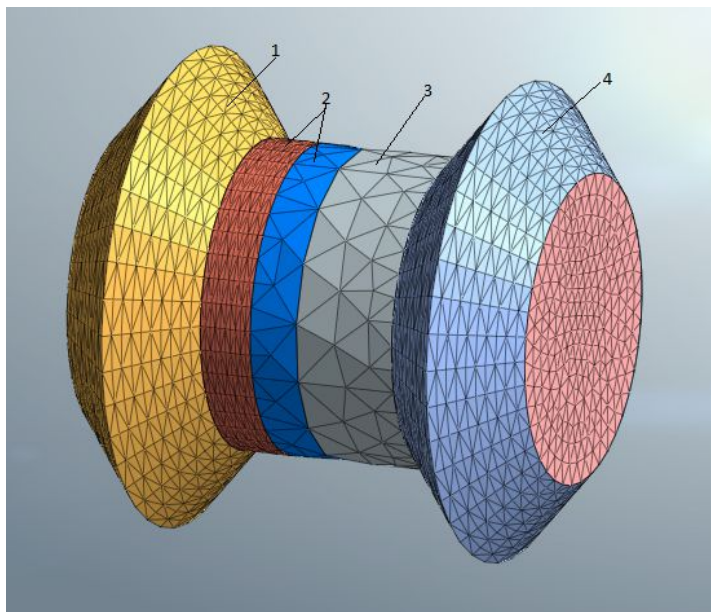
Druhý návrh těsnící zátky je hodně podobný prvnímu návrhu, liší se v použití materiálu některých jednotlivých částí. Vzhledově jsou avšak stejné.

Hlavní části zátky jsou vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu, bentonitové těsnění, těsnění ze stříkaného vláknobetonu, vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu. Zátka je navržena ze dvou materiálů a to stříkaného vláknobetonu a bentonitu, viz obr. 24.

Vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu musí splňovat dvě funkce - statickou a hydraulickou. Je umístěná u čelby. Kolem vnitřní zátky je vytvořený límec ze stejného materiálu, který zasahuje do horninového prostředí. Na vnitřní část zátky působí tlaky 2, 5 a 7 MPa. Dále navazuje betonová část a bentonitové těsnění, které mají za úkol hydraulicky oddělit a těsnit prostory před a za zátkou. Tato část mezi zátkami je rozdělena na dvě části,

každá z jiného materiálu. První část za vnitřní zátkou je z drenážního betonu a druhá z bentonitu.

Vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu navazuje na část z bentonitu. Tato část zátky uzavírá celý návrh. Konstrukce vnější zátky je stejná s vnitřní zátkou. Funkcí zátky je mechanická stabilizace celku.



Obrázek 24: 2. návrh těsnící zátky

1 – vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu

2 – bentonitové těsnění

3 – těsnící část zátky ze stříkaného vláknobetonu

4 – vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu

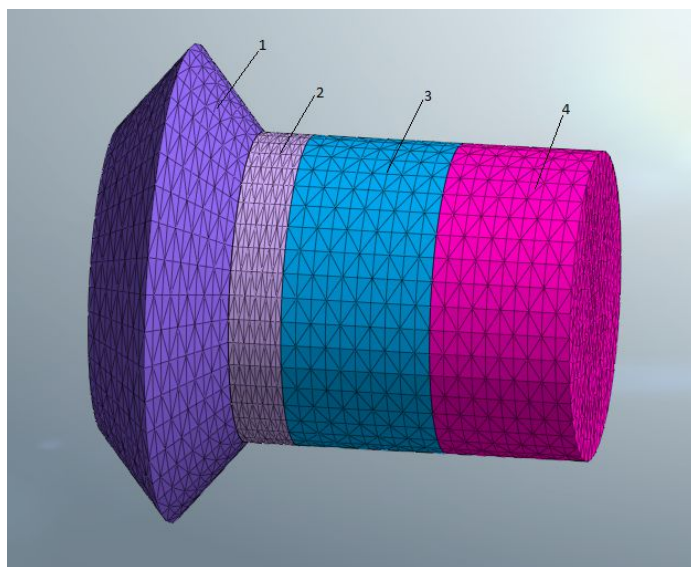
3.5.3 3. návrh těsnící zátky

Poslední návrh těsnící zátky je od obou předešlých návrhů odlišný tvarem zátky. Zátka je navržena ze stříkaného vláknobetonu a drenážního betonu.

Hlavní části zátky jsou vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu, těsnící část zátky z drenážního betonu a stříkaného vláknobetonu, vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu viz obr. 25.

Vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu má dokola vytvořený límec ze stejného materiálu, je od předchozích návrhů odlišným svým tvarem. Také musí splňovat funkci statickou a hydraulickou také je umístěna u čelby. Na vnitřní zátku působí tlaky 2, 5 a 7 MPa. Na ní navazuje část těsnící ze stříkaného vláknobetonu a stěna z drenážního betonu, sloužící jako podpora pro těsnění a zároveň jako ztracené bednění pro vnější zátku ze stříkaného vláknobetonu.

Vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu uzavírá celý návrh. Její konstrukce je stejná jako vnitřní zátka. Funkcí této zátky je mechanická stabilizace celku.



Obrázek 25: 3. návrh těsnící zátky

1 – vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu

2 – stěna z drenážního betonu

3 – těsnící část zátky ze stříkaného vláknobetonu

4 – vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu

4. Analýza výsledků modelování různých variant těsnící zátky

Pro analýzu výsledků různých návrhů těsnících zátek byly použity sloupcové grafy. Pro každý tlak (2, 5 a 7 MPa), který působí na zátku, je vyhodnocen samostatný graf. Pro každý tlak jsou zobrazeny všechny tři návrhy těsnících zátek.

Vyhodnocovala jsem ze softwaru MIDAS GTS NX tyto hodnoty:

- deformace ve směru osy x (podélná osa zátky),
- napětí v tahu,
- napětí v tlaku,
- maximální smykové napětí,
- plastické body.

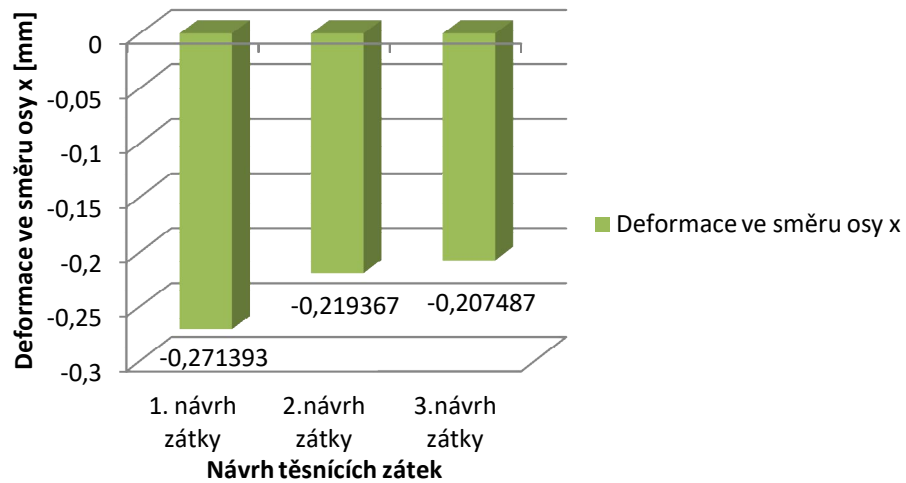
Z výsledků je pak zřejmé nejvhodnější varianta těsnící zátky pro použití v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů.

4.1 Deformace ve směru osy x (podélná osa zátky)

V této kapitole sledujeme deformační stav zátky odpovídající výpočtového modelu. Posuny v podélném směru osy x se u každého návrhu lišily, jelikož jsem měnil tvar zátky a materiál. Posuny se měnily díky působení tlaku na zátku ze zadní strany (u prvního návrhu tlakovací komora, u druhého a třetího vnitřní zátka) 2, 5 a 7 MPa. Toto můžeme na grafu vidět 1, 2 a 3 vyhodnocení výsledků různých variant zátek při daném tlaku na zátku. Těsnící zátka vykazuje pouze malou deformační odezvu na zatížení.

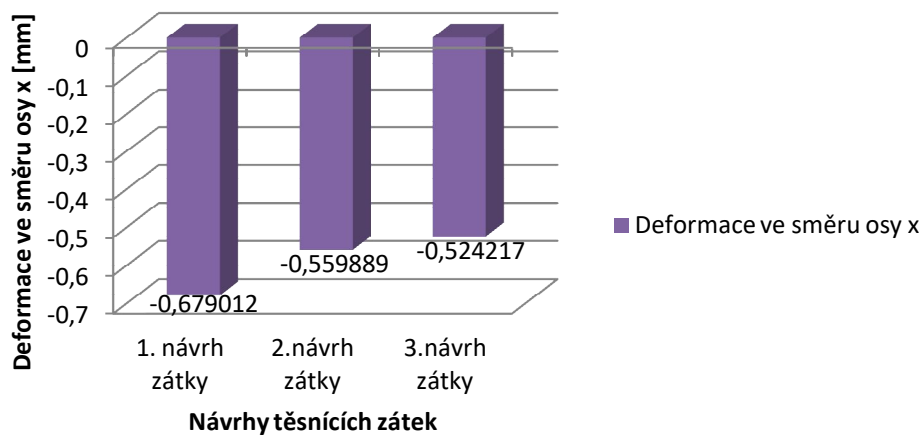
Lokalizace minimálních hodnot je u konstrukce vnější zátky a na jejím límci a povrchu, jak můžeme vidět na obr. 26, 27 a 28, které vykreslují velikost daných posunů u každého návrhu při tlaku 7 MPa. Dále je zřejmé, že maximální hodnoty posunů jsou uprostřed konstrukce. Minimální posuny v podélném směru osy x nabývají hodnotu $-1,539 \cdot 10^{-5}$ m, která se vyskytuje u prvního návrhu při tlaku 5 MPa. Maximální posun v podélném směru osy x má hodnotu $-2,075 \cdot 10^{-4}$ m u třetího návrhu, ale při tlaku 2 MPa. Pro lepší zobrazení posunů v konstrukci máme dané řezy kolem osy y (obr. 27, 29 a 31), konstrukce zátek je otočená o 180°.

Deformace ve směru osy x při tlaku 2 MPa

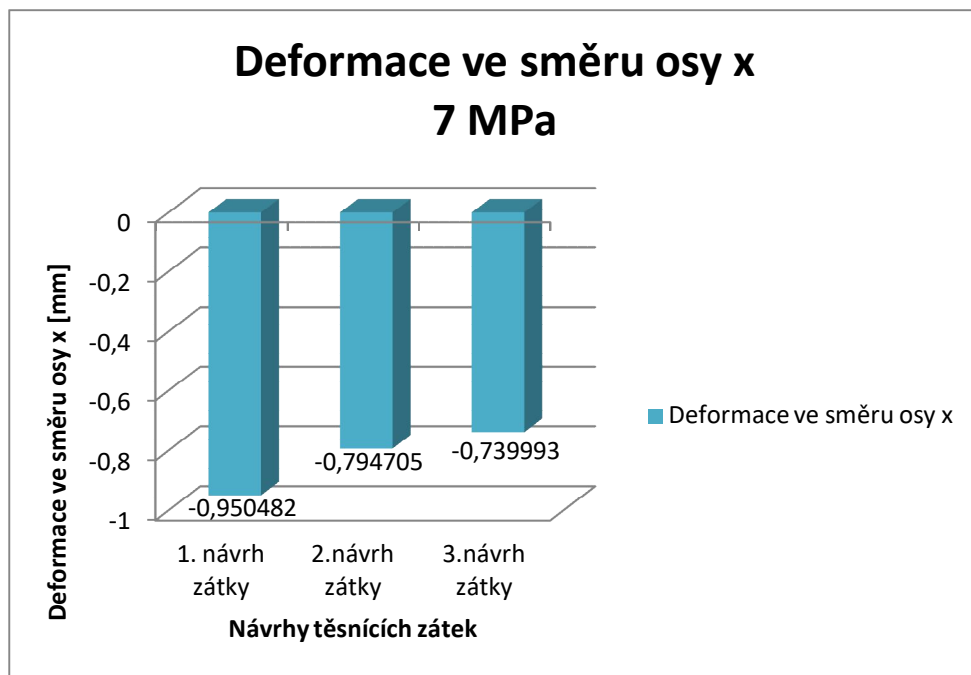


Graf 1: Deformace ve směru osy x při tlaku 2MPa

Deformace ve směru osy x při tlaku 5 MPa



Graf 2: Deformace ve směru osy x při tlaku 5 MPa

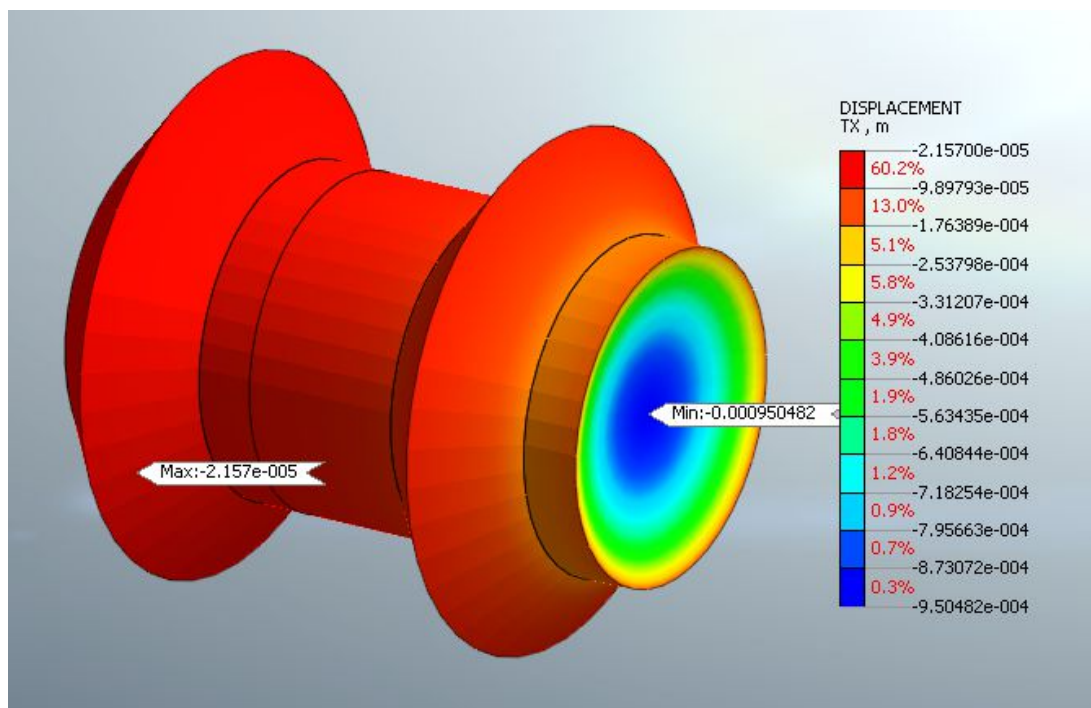


Graf 3: Deformace ve směru osy x při tlaku 7 MPa

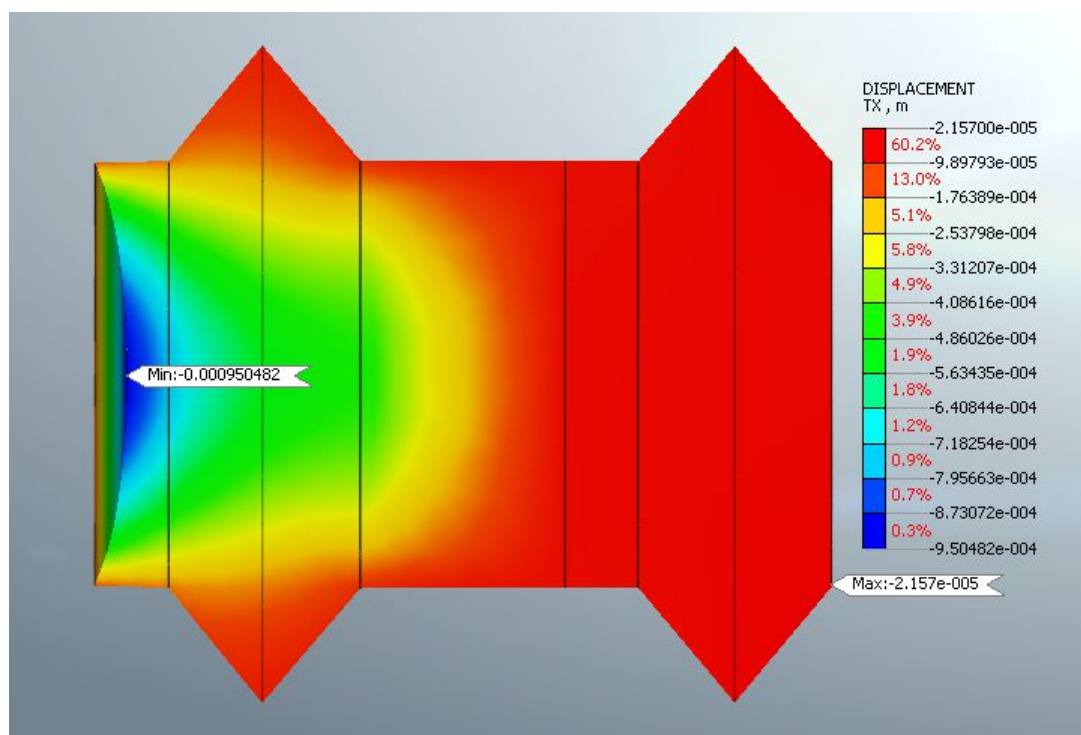
U prvního návrhu máme bentonitovou část zátky větší a také tlakovací komoru z drenážního betonu (tuhá část), zde nám vznikají největší posuny.

U dalších dvou návrhů těsnících zátek jsou posuny ve směru podélné osy x zátky menší ve srovnání s prvním návrhem, a to z důvodu jiného návrhu a použitých materiálů. Jelikož u těchto dvou návrhů je jiný návrh zátky a taky jiné složení materiálů, posuny mají podobné hodnoty. I přesto, že první a druhý návrh těsnící zátky je hodně podobný (s výjimkou bentonitové části konstrukce, která je u každého návrhu jinak velká, a tlakovací komoře, která je jen u prvního návrhu), se hodnoty posunů ve směru podélné osy x těsnící zátky stanovené modelem snižují.

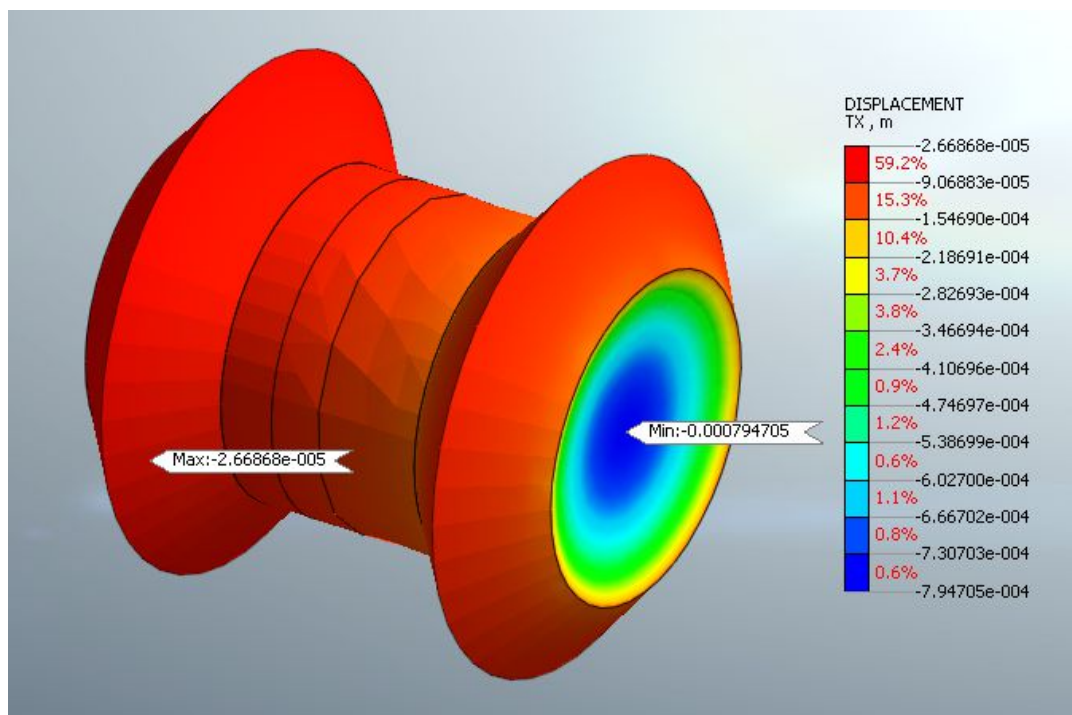
Modelově stanovené posuny těsnící zátky ve směru její podélné osy x dosahují nízkých hodnot (řádově maximálně cca 1 mm), avšak v reálných podmínkách lze předpokládat vznik trhlin, snížení deformačního modulů materiálů zátky (materiálové změkčení) a nárůst reálných deformací zátky.



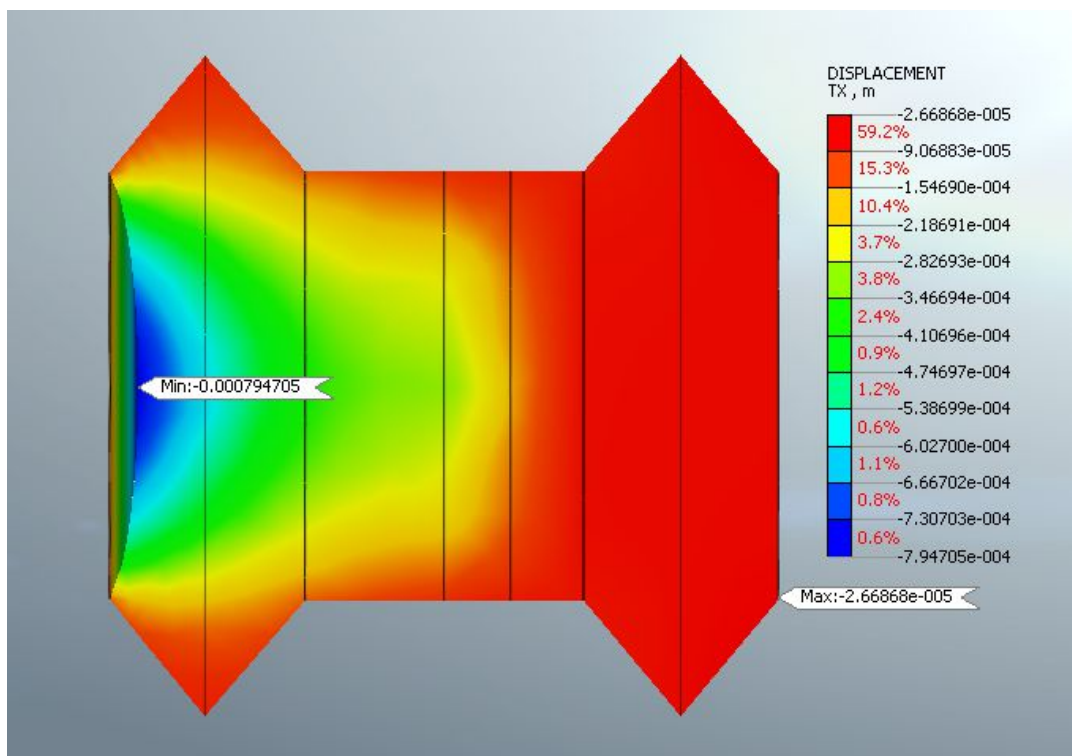
Obrázek 26: Posuny při tlaku 7 MPa - 1. Návrh



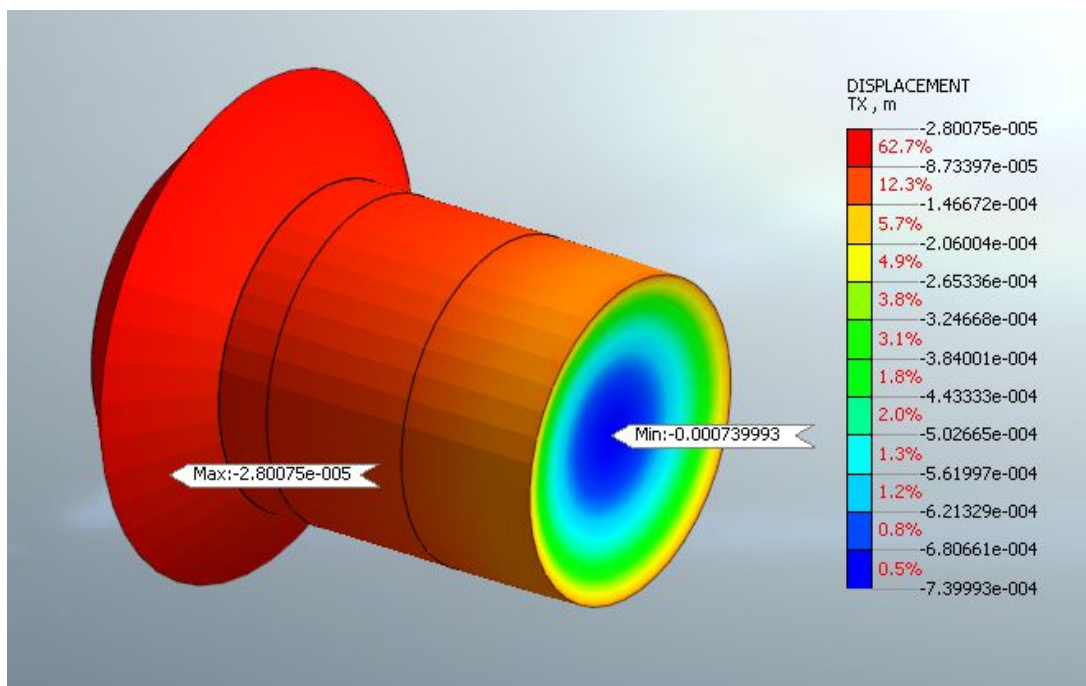
Obrázek 27: Řez zátkou - 1. návrh



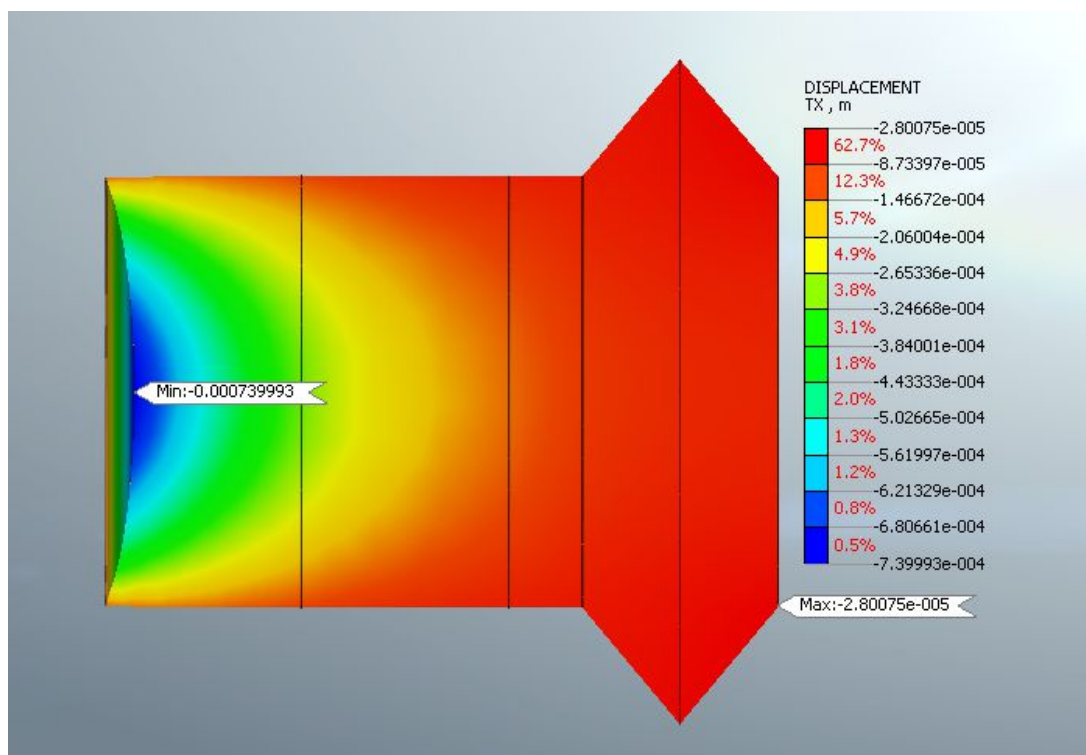
Obrázek 28: Posuny při tlaku 7 MPa - 2. Návrh



Obrázek 29: Řez zátkou - 2. návrh



Obrázek 30: Posuny při tlaku 7 MPa - 3. Návrh



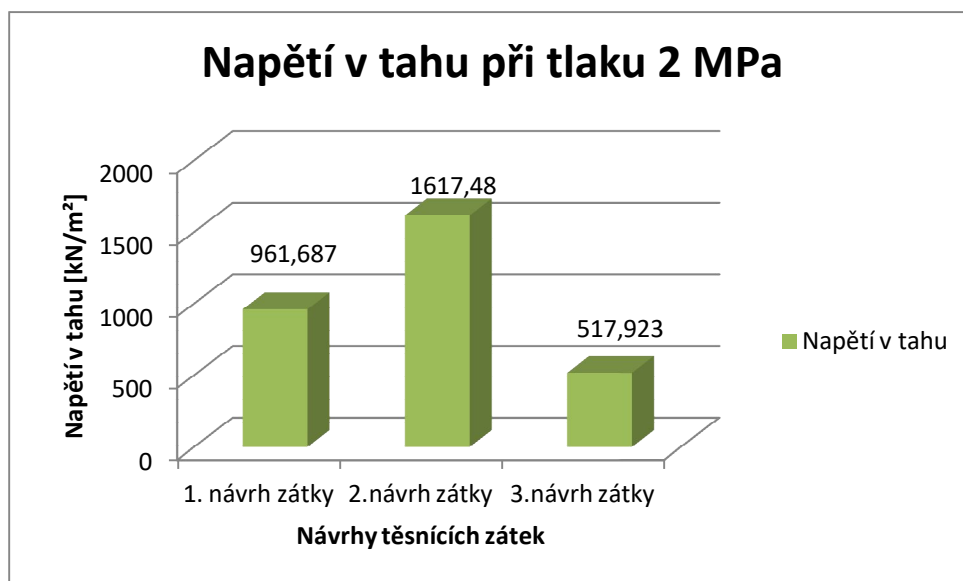
Obrázek 31: Řez zátkou - 3. Návrh

4.2 Napětí v tahu

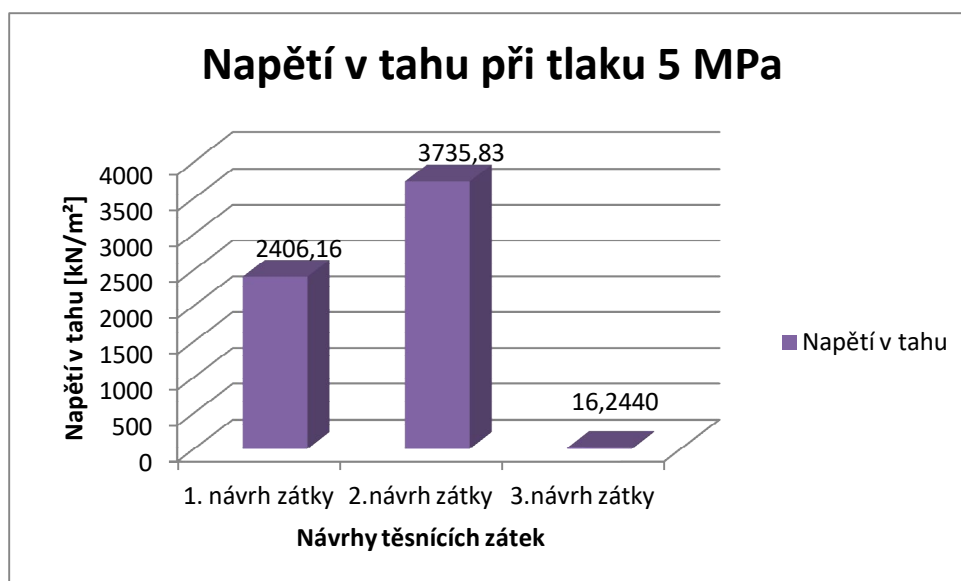
V této kapitole se budeme zabývat napětím v tahu na všechny návrhy těsnících zátek. Napětí v tahu se nám u různých návrhů liší. Na grafech 4, 5 a 6 můžeme vidět vyhodnocení výsledků různých variant zátek při daném tlaku na zátku 2, 5 a 7 MPa.

U druhého návrhu těsnící zátky máme největší tahové napětí. Jelikož má třetí návrh jinou konstrukci zátky, je z grafu vidět, že má nejmenší napětí v tahu. Při tlaku 7 MPa mám vznikají obě hodnoty (maximální a minimální) napětí v tlaku.

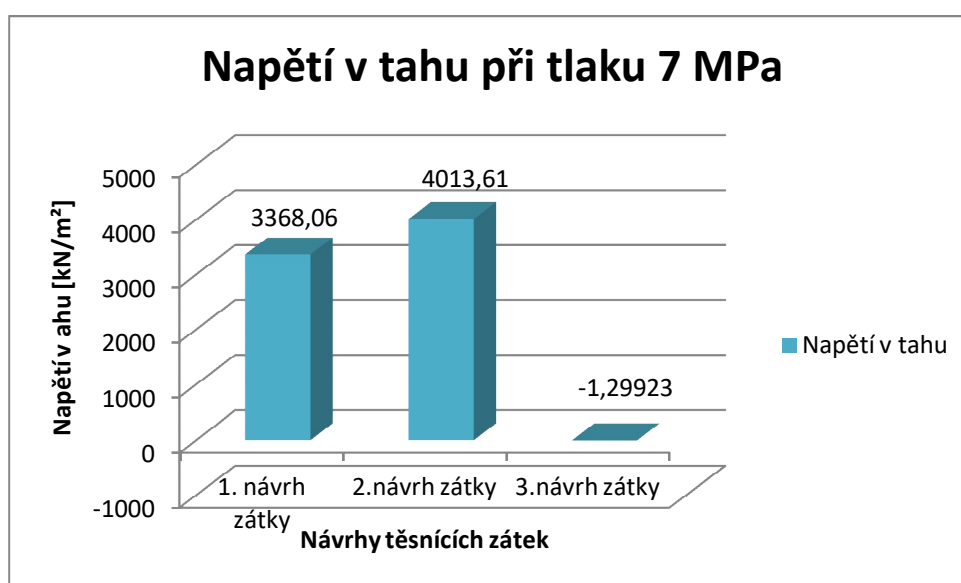
Lokalizace maximálních hodnot tahových napětí se nachází uprostřed těsnící zátky, a to u všech tří návrhů. Zatímco minimální hodnota tahového napětí je indikována u první i druhé varianty těsnící zátky po obvodu vnitřní zátky, u třetího návrhu platí tento závěr pouze při nejnižším analyzovaném zatížení 2 MPa. Z hlediska tahových napětí nám při tlaku 5 a 7 MPa, maximální hodnoty tahových napětí jsou lokalizovány modelem až do 1/3 délky konstrukce zátky.



Graf 4: Napětí v tahu při tlaku 2 MPa

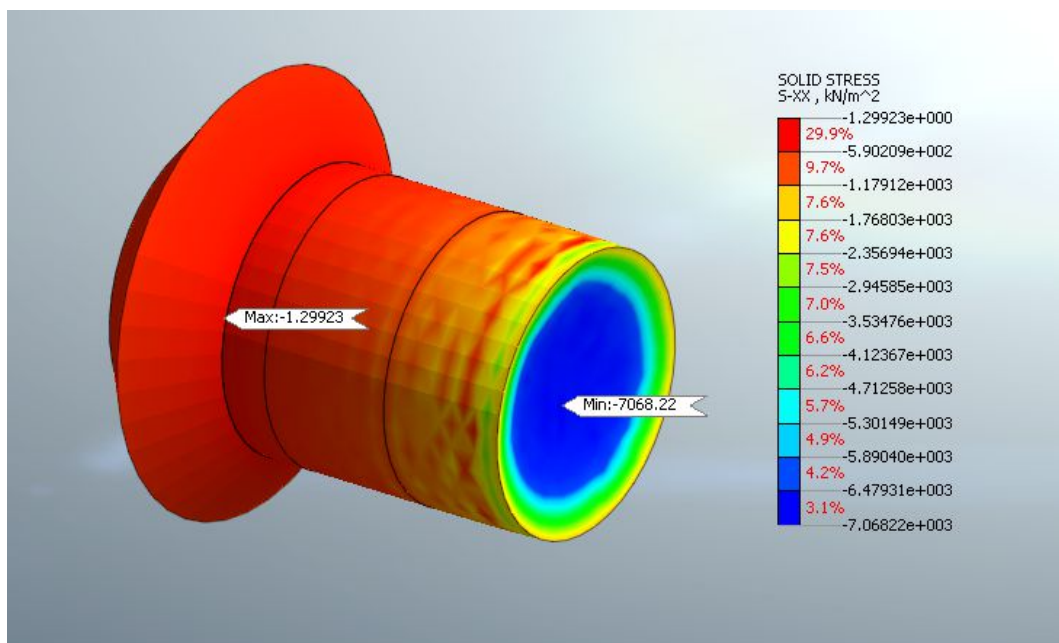


Graf 5: Napětí v tahu při tlaku 5 MPa



Graf 6: Napětí v tahu při tlaku 7 MPa

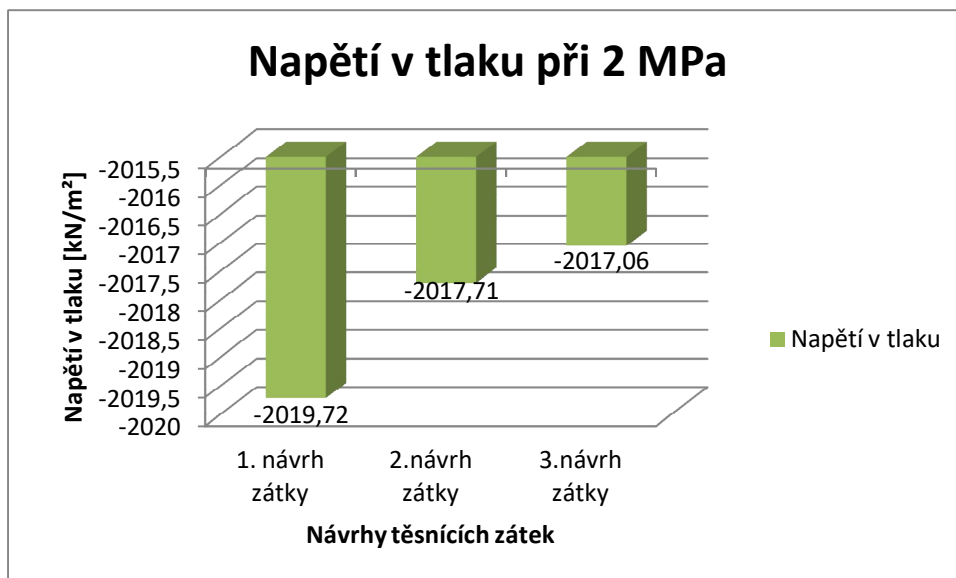
U třetího návrhu zátky při tlaku 7 MPa můžeme vidět, že nám nevzniká tahové napětí ale maximální a minimální hodnota napětí odpovídá napětí tlakovému. Hodnoty napětí v tlaku u tohoto návrhu můžeme vidět na obr. 32, kde vidíme celkový průběh napětí v tělese třetího návrhu zátky.



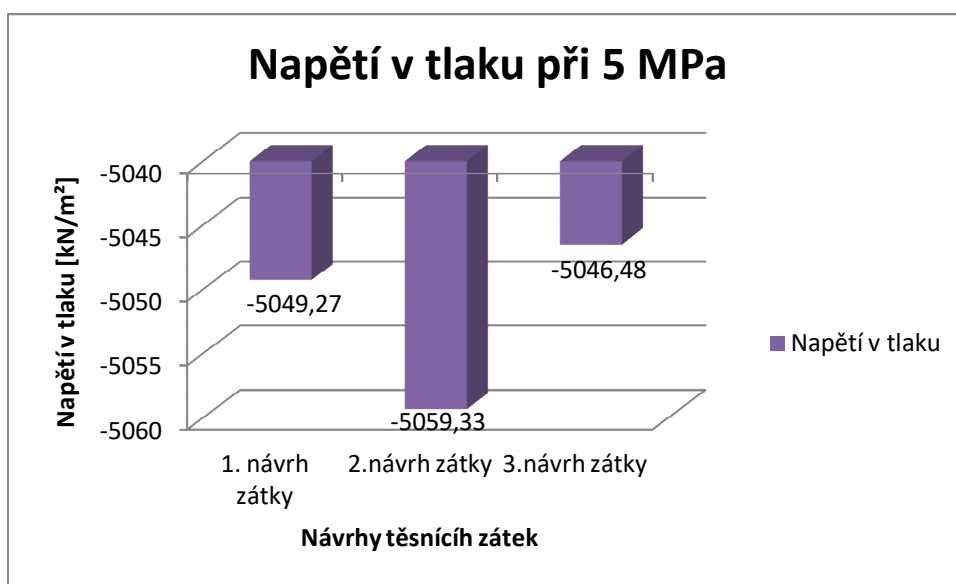
Obrázek 32: 3. Návrh zátky – průběh napětí při tlaku 7 MPa

4.3 Napětí v tlaku

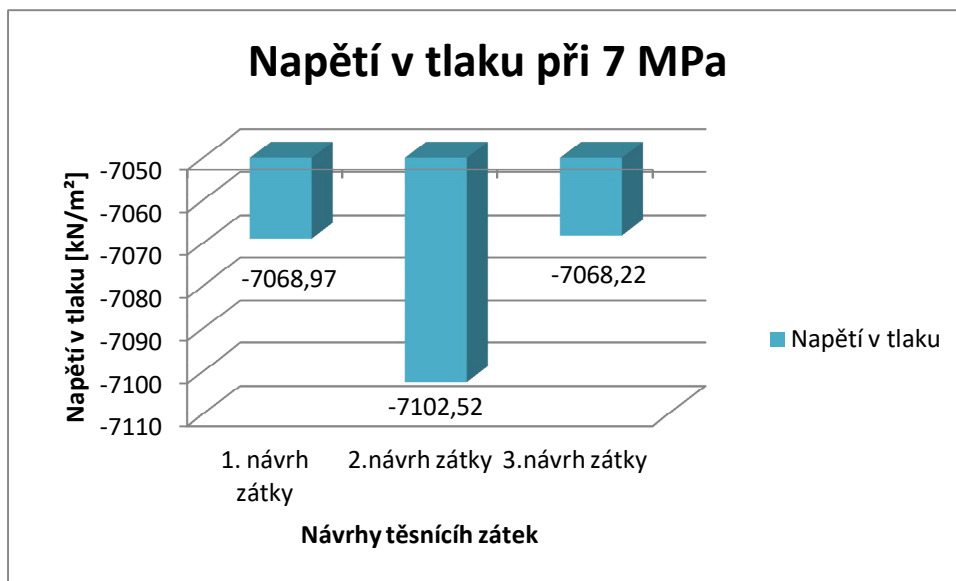
Kapitola se věnuje napětí v tlaku u všech tří návrhů těsnící zátky. Hodnoty tlakového napětí u všech variant těsnící zátky se nám od sebe natolik neliší. Na grafech 7, 8 a 9 můžeme vidět vyhodnocení výsledků různých variant zátek při daném tlaku na zátku 2, 5 a 7 MPa. Při působení tlaku 2 MPa na zátku jsou tlaková napětí největší u prvního návrhu zátky. Kdežto při tlaku 5 a 7 MPa jsou tlaková napětí největší u druhého návrhu. První a třetí návrh těsnící zátky, mají podobné hodnoty v napětí v tlaku, při působení tlaku 5 a 7 MPa.



Graf 7: Napětí v tlaku při tlaku 2 MPa



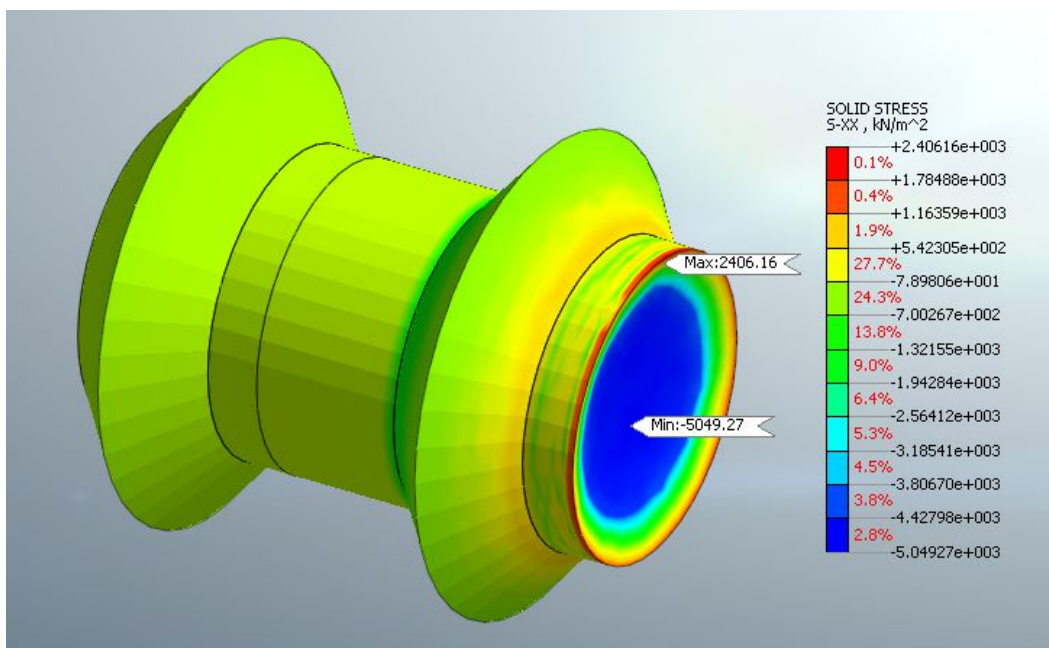
Graf 8: Napětí v tlaku při tlaku 5 MPa



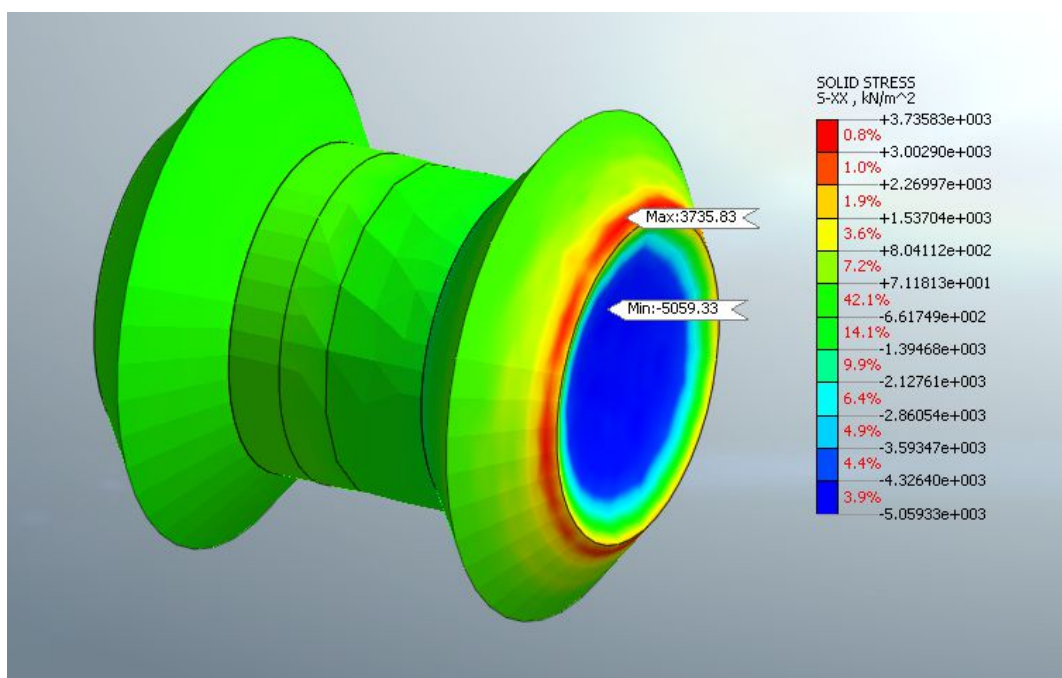
Graf 9: Napětí v tlaku při tlaku 7 MPa

U třetího návrhu máme nejmenší hodnoty napětí v tlaku, konstrukce odlišná od ostatních návrhů zátky, díky tomu že má jen jeden límec u vnější zátky, ale také díky materiálu, ze kterých je zátka navržena (stříkaný vláknobeton a drenážní beton). Nejmenší hodnota tlakového napětí při působení tlaku 7 MPa je $-7068,22 \text{ kN/m}^2$.

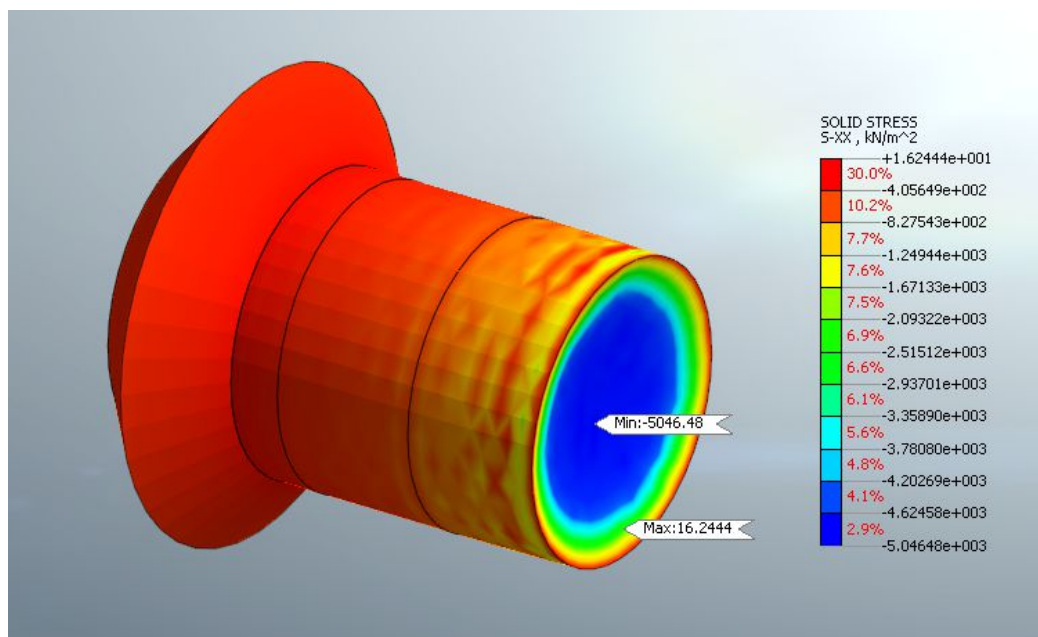
Na obr. 33, 34 a 35 můžeme vidět průběhy napětí v tlaku a v tahu všech tří návrhů zátky při tlaku 5 MPa. Lokalizace minimálních hodnot tlakových napětí se nachází po obvodě vnější konstrukce zátky (obr. 33, 34), u třetího návrhu minimální hodnoty tahových napětí jsou lokalizována modelem až do 1/3 délky konstrukce zátky. (obr. 35). Maximální hodnota tlakových napětí se nachází uprostřed konstrukce zátek.



Obrázek 33: Napětí v tahu a tlaku pro 1. návrh



Obrázek 34: Napětí v tahu a tlaku pro 2. návrh



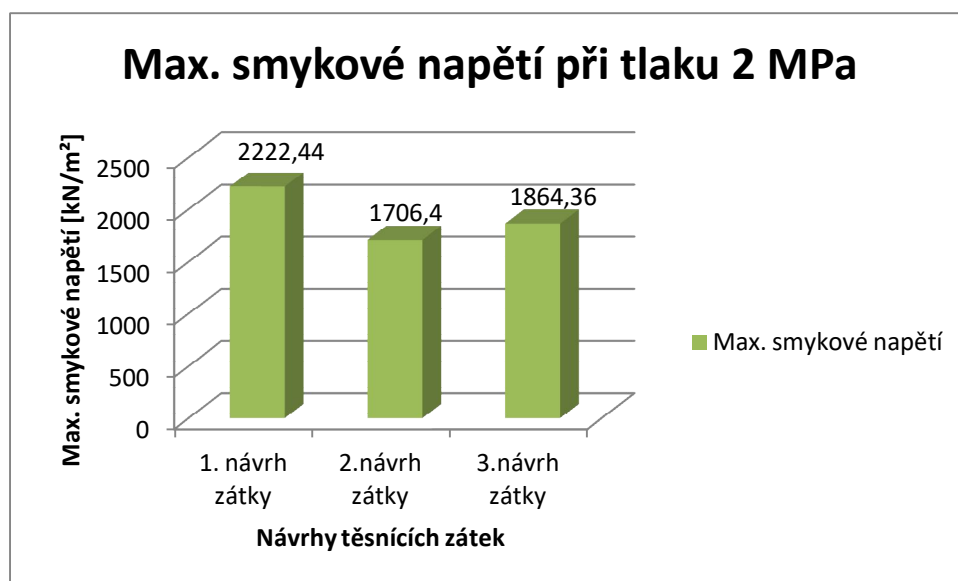
Obrázek 35: Napětí v tahu a tlaku pro 3. návrh

4.4 Maximální smykové napětí

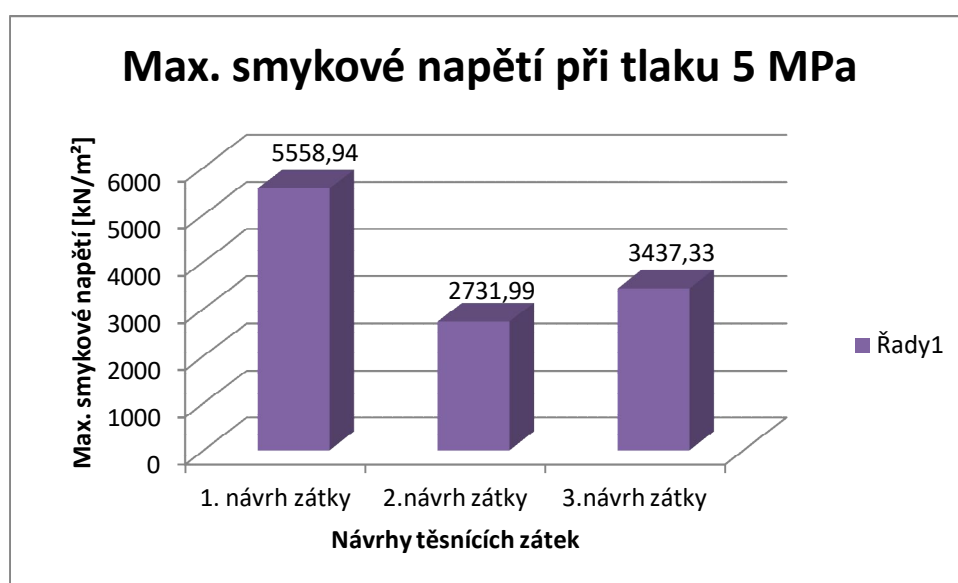
V této kapitole se věnují maximálnímu smykovému napětí v tělese těsnících zátek. Podmínka smykového napětí neboli Mohrova podmínka pevnosti a plasticity. „Podle této teorie jsou vyhovujícím činitelem vzniku plastického přetváření nebo porušení složky napětí v této ploše, ve které k tomuto jevu dojde. Porucha nastává usmyknutím podél určité plochy (v níž se materiál plasticky přetváří), která je však ovlivněna tangenciálním a normálovým napětím. Graficky tato podmínka vyjadřuje *obalovou křivkou Mohrových kružnic*.

„Při posuzování, zda nastane nebo nenastane porušení, stačí do obalované křivky zakreslit maximální Mohrovu kružnici působících napětí. Porušení nastane, seče-li kružnice napětí mezní křivku. V případě, že kružnice napětí leží pod obalovou křivkou nebo se ji nanejvýš dotýká, porušení nenastane“.[29]

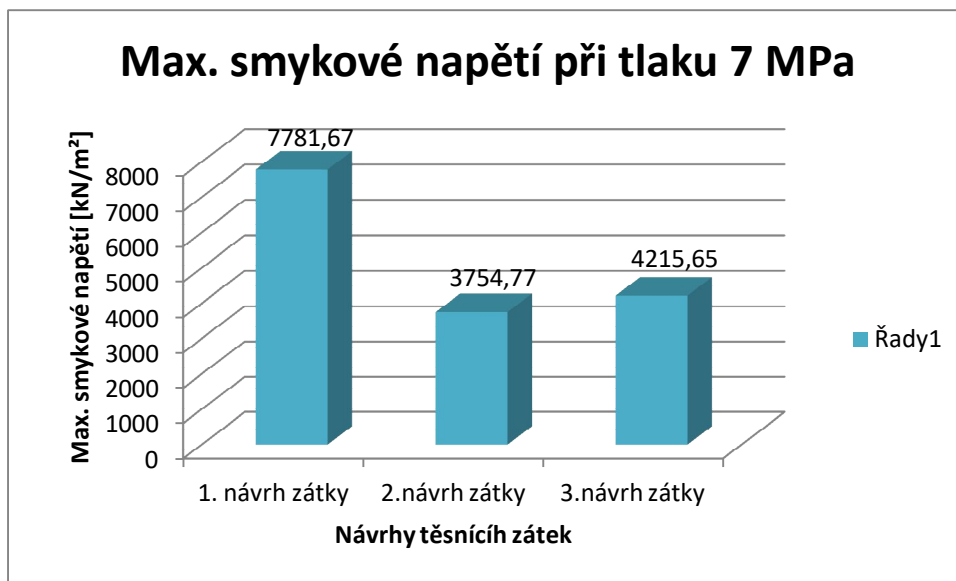
Lokalizace maximálních hodnot smykového napětí je po obvodu konstrukce z vnitřní zátky, kde na ně působí tlak 2, 5 a 7 MPa a minimální hodnoty se nám zobrazují uprostřed konstrukce. Tyto průběhy můžeme vidět na obr. 36, 38 a 40. Pro lepší zobrazení průběhu smykového napětí v konstrukci máme dané řezy kolem osy y (obr. 37, 39 a 41), konstrukce zátek je otočená o 180°. Rozložení smykových napětí v tělese zátky odpovídá maximálním rozdílům hlavních napětí. Následkem smykových napětí je geometrie daných variant těsnících zátek a také jejich materiálová skladba.



Graf 10: Max. smykové napětí při tlaku 2 MPa



Graf 11: Max. smykové napětí při tlaku 5 MPa



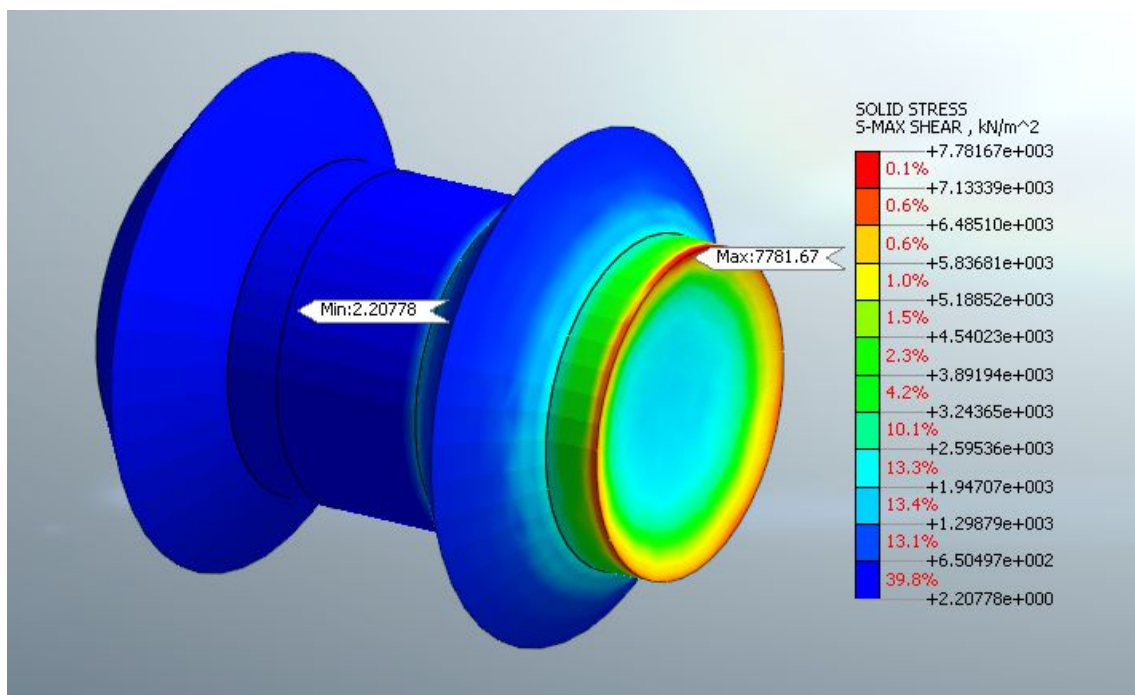
Graf 12: Max. smykové napětí při tlaku 7 MPa

Na grafech 10, 11 a 12 vidíme, že maximální smykové napětí je největší u prvního návrhu těsnící zátky a nejmenší u druhého návrhu. Obr. 36 – 41 znázorňují vyhodnocení smykových napětí pro variantní návrhy těsnících zátek při tlaku 7 MPa.

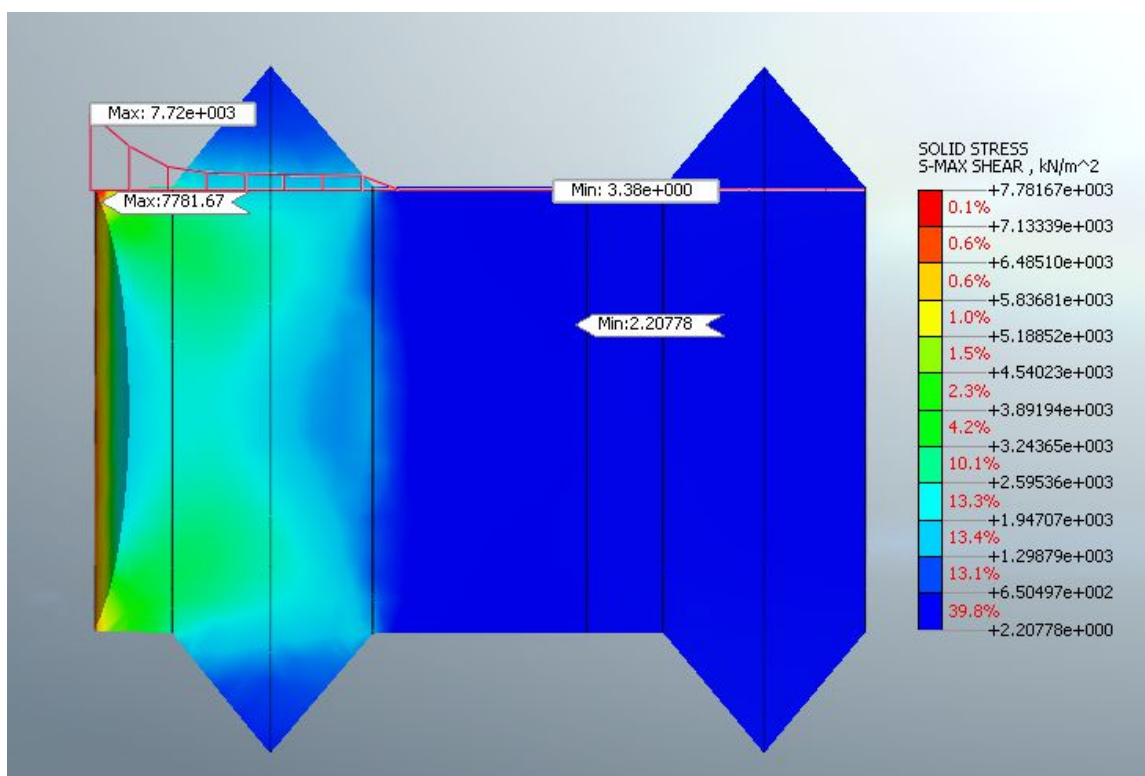
V řezech vidíme průběh smykového napětí na horní straně ploše zátky, kde je zřejmé, že maximální hodnota je po obvodě vnitřní konstrukce zátky, kde na ně působí tlak, a jak je rozsáhlé smykové napětí ve směru podélné osy x těsnící zátky. Třetí návrh těsnící zátky považujeme za nejhorší variantu (obr. 37, 38). Na těchto obrázcích můžeme vidět, že smykové napětí zasahuje téměř po celé konstrukci zátky.

Nejvhodnějším návrhem, v závislosti na smykovém napětí, je první návrh těsnící zátky. Smykové napětí nám zasahuje hlavně do první (tlakovací komora) a do druhé (vnitřní zátky s límcem) části těsnící zátky (obr. 36, 37).

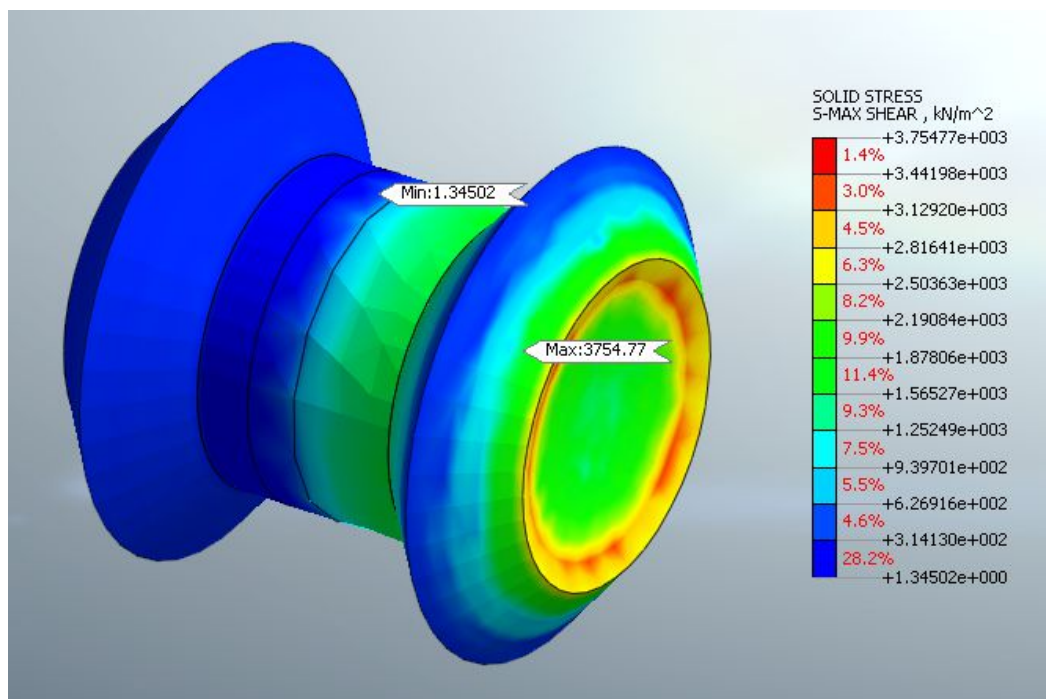
V důsledku zvýšených kontaktních smykových napětí může docházet k porušení tělesa těsnící zátky v oblasti kontaktu s horninovým prostředím, ke vzniku trhlin a potenciálně k narušení požadované těsnosti zátky.



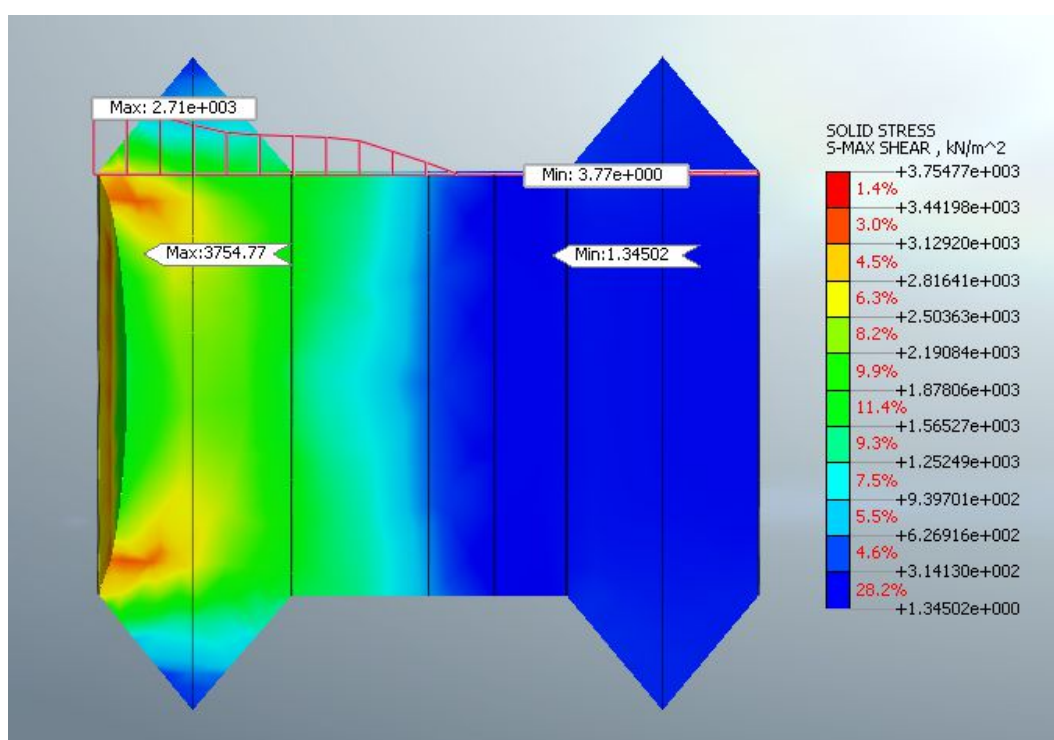
Obrázek 36: Max. smykové napětí – 1. návrh



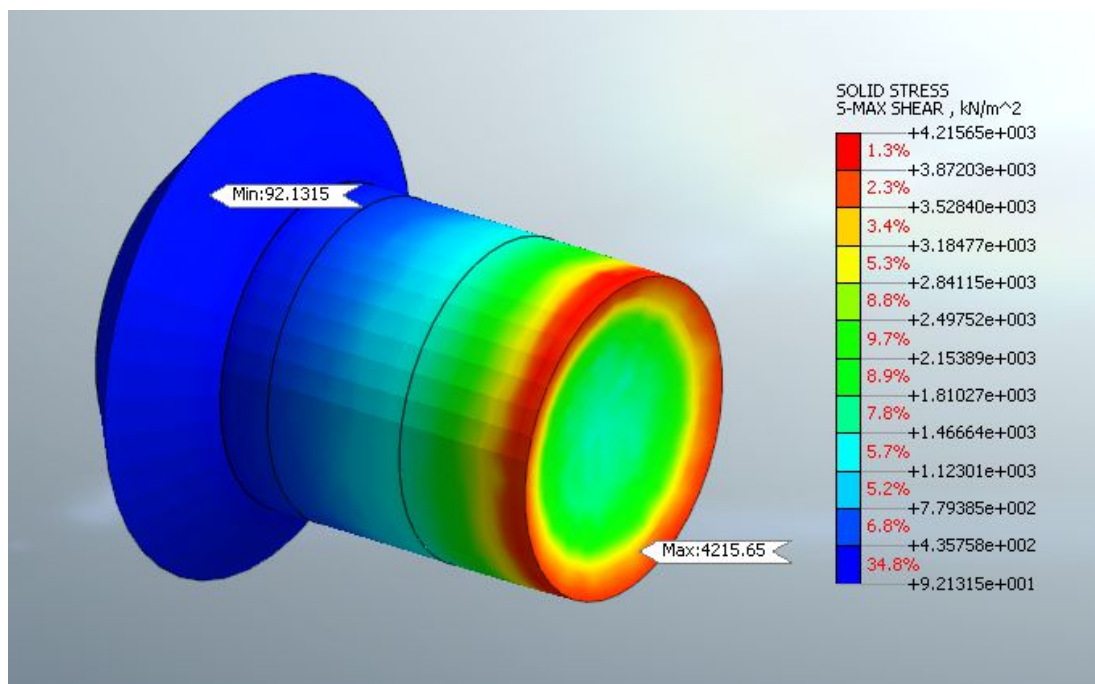
Obrázek 37: 1. návrh - řez max. smykovým napětím



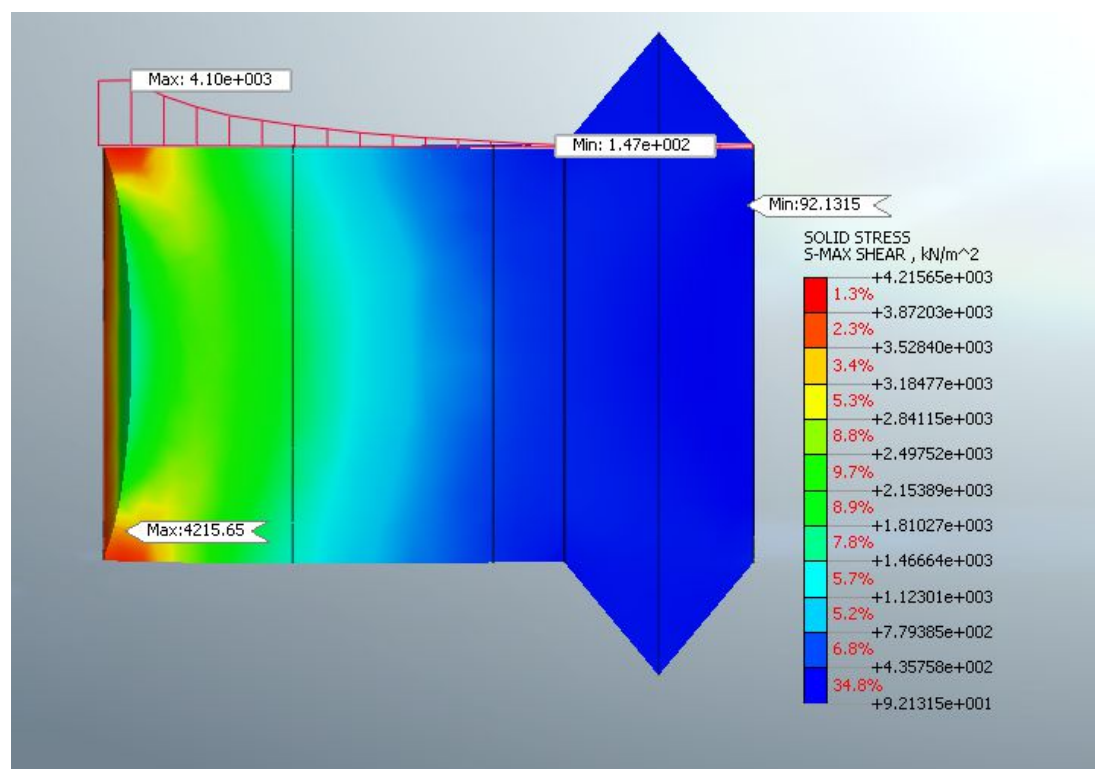
Obrázek 38: Max. smykové napětí - 2. návrh



Obrázek 39: 2. návrh - řez max. smykovým napětím



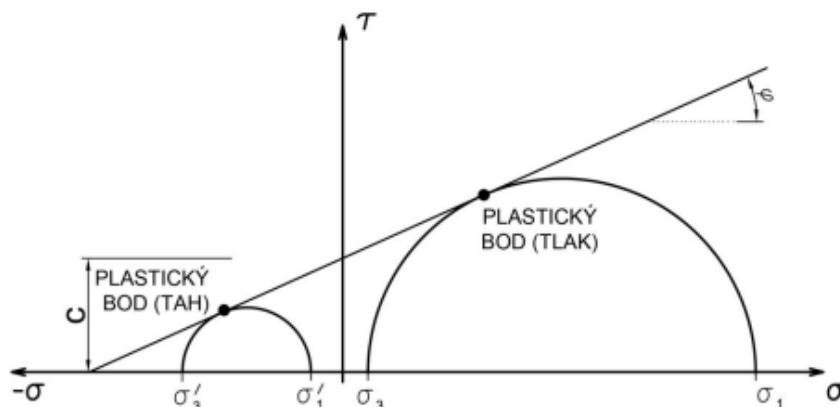
Obrázek 40: Max. smykové napětí - 3. návrh



Obrázek 41: 3. návrh - řez max. smykovým napětím

4.5 Plastické body

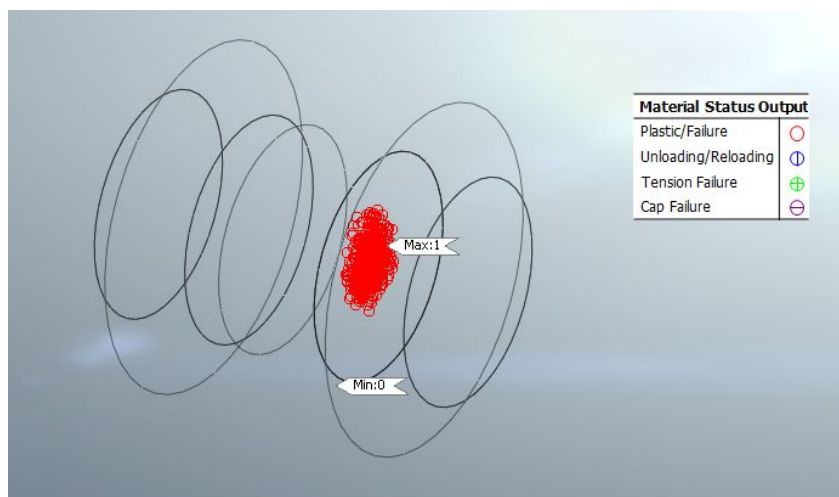
Plastické body jsou body ležící současně na Mohrově kružnici a na obálce porušení (obr. 42). Mohou vznikat při tlakovém nebo tahovém namáhání, kdy je dovršeno maximální smykové únosnosti materiálu. Po dosažení plastických bodů při namáhání tlakem a tahem mohou vznikat trhliny.



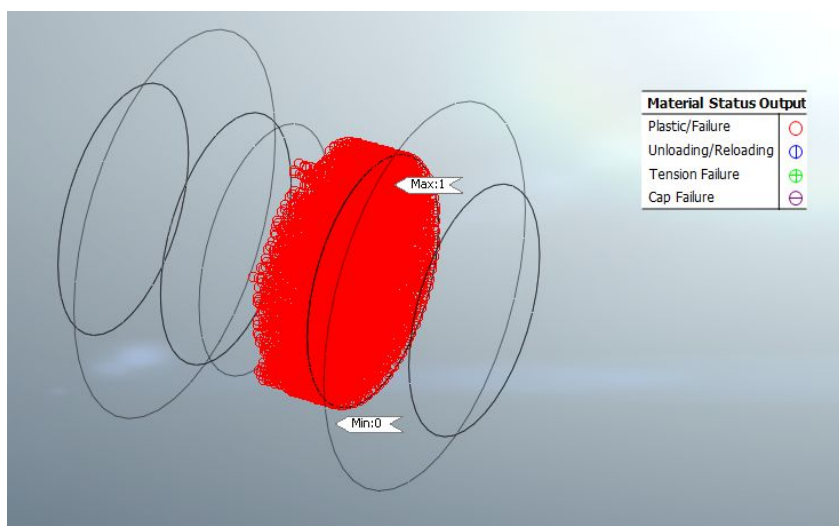
Obrázek 42: Plastické body na Mohr-Colombově obálce pevnosti

Oblasti potenciálního porušení a plastického přetváření jsou u všech variant návrhů těsnící zátky. Při působení většího tlaku nám vzniká daleko více plastických bodů. Plastické body jsou lokalizovány v bentonitové části konstrukce (u prvního a druhého návrhu zátky) a po obvodu vnitřní konstrukce zátky v místě kde je zátka zatížena. Díky maximálnímu smykovému napětí můžeme vidět, kde nám plastické body vznikají po obvodě konstrukce. Při daném zatížení 2 MPa nám plastické body nevznikají u druhého a třetího návrhu těsnící zátky.

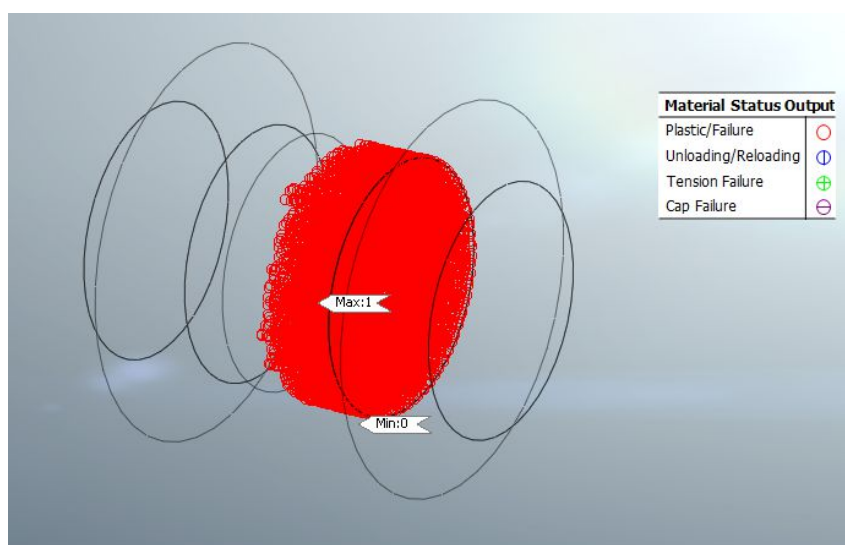
U prvního návrhu se plastické body zobrazují jen v bentonitové těsnící části konstrukce zátky (obr. 43, 44 a 45). U druhého návrhu jsou lokalizovány v bentonitové části konstrukce zátky, ale i po obvodu vnitřní zátky (obr. 46, 47). U posledního návrhu jsou plastické body lokalizovány po obvodu vnitřní zátky (obr. 48, 49). Počet plastických bodů u daných návrhů není uveden, jelikož v programu MIDAS GTS NX zatím není funkce, která by umožnila získat počet plastických bodů. Může docházet k porušení tělesa těsnící zátky v oblasti kontaktu s horninovým prostředím, ke vzniku trhlin a potencionálně k narušení požadované těsnosti zátky. Díky trhlinám se nám můžou snižovat deformační modely daných materiálů různých variant těsnící zátky.



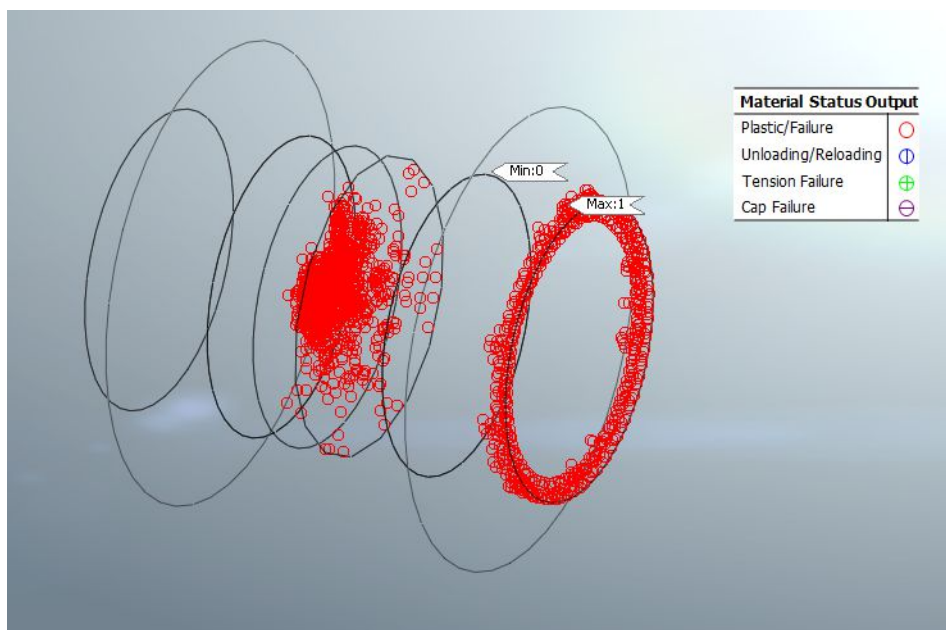
Obrázek 43: Plastické body - 1. návrh, tlak 2MPa



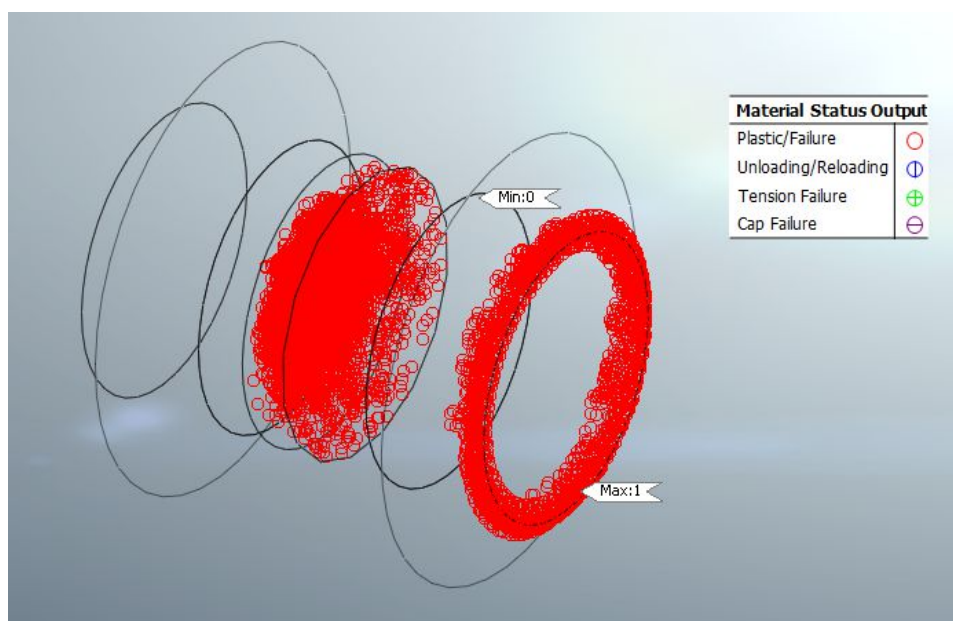
Obrázek 44: Plastické body - 1. návrh, tlak 5 MPa



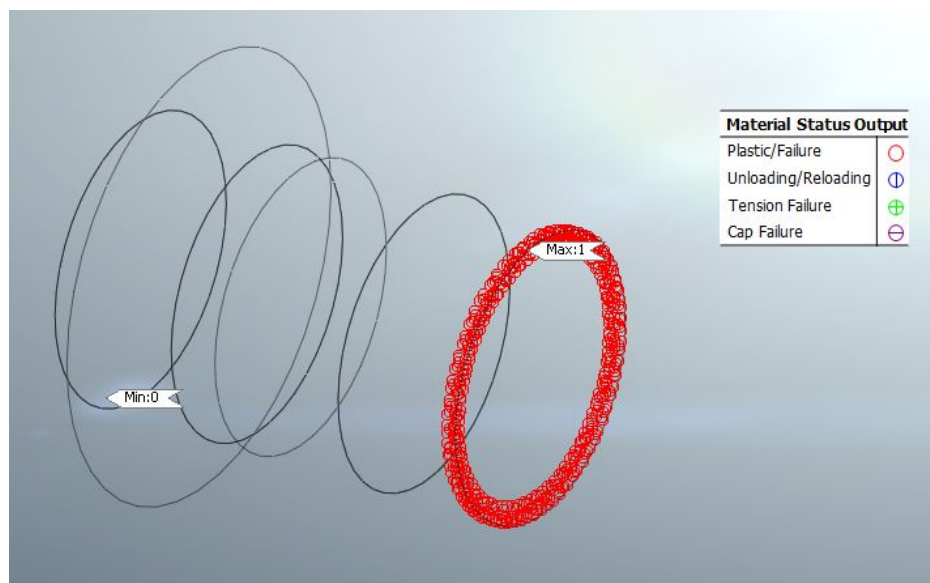
Obrázek 45: Plastické body - 1. návrh, tlak 7 MPa



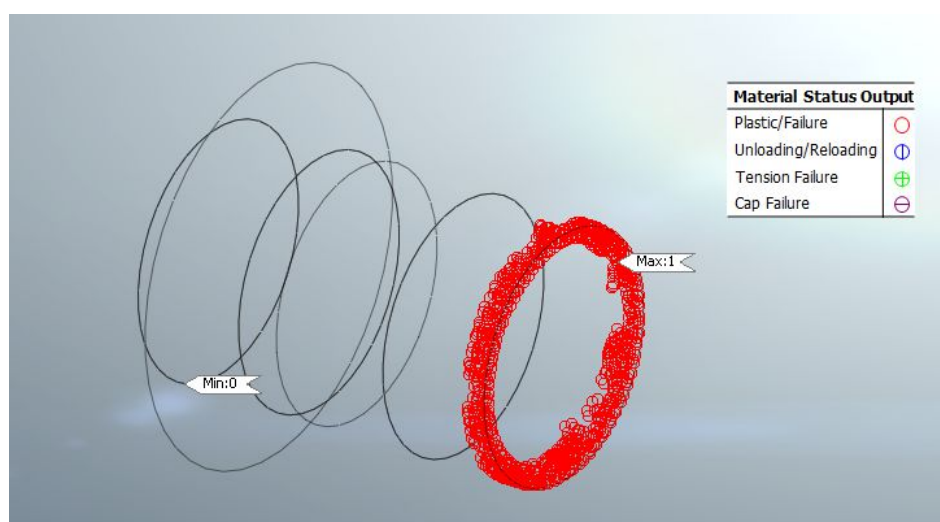
Obrázek 46: Plastické body - 2. návrh, tlak 5 MPa



Obrázek 47: Plastické body - 2. návrh, tlak 7MPa



Obrázek 48: Plastické body - 3. návrh, tlak 5 MPa



Obrázek 49: Plastické body - 3. návrh, tlak 7 MPa

5. Závěr

Úkolem mé diplomové práce byla parametrická modelová studie tří návrhů chování těsnicí zátky v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů. Byly analyzovány tři variantní konstrukce těsnicí zátky, které budou vyhovovat hlubinnému úložišti radioaktivních odpadů v České Republice do budoucna. První varianta odpovídá experimentální těsnicí zátce EPSP testované v rámci projektu DOPAS na lokalitě podzemní laboratoři Josef, další dvě varianty byly navrženy autorkou práce. Zátky byly navrženy z českých materiálů, které jsou u nás dostupné. Velký důraz byl kladen na působení tlaku z čela zátky při hodnotách 2, 5 a 7 MPa. Jelikož RAO vzniká i u nás, musíme do budoucna počítat s bezpečným uložením v HÚ. Tomuto geotechnickému problému se přikládá stále větší váha.

Návrhy jsou zpracovány do trojrozměrných numerických modelů vytvořených v geotechnickém programu Midas GTS NX, pro vyhodnocení jsem použila nelineární statickou analýzu. Vstupní materiálové i geometrické parametry použité pro modely těsnicích zátek byly převzaty z experimentu EPSP, který je součástí projektu DOPAS. Chybějící charakteristiky materiálu a horninového prostředí byly čerpány z odborné literatury a internetových stránek, které byly doplněny k návrhům těsnicí zátky. Jedná se pouze o zjednodušenou 3D modelovou studii, která nezohledňuje všechny možné vlivy určující reálné chování zátky (změkčení materiálu zátky v důsledku možného vzniku trhlin v tělese zátky, zohlednění charakteru kontaktu mezi zátkou a horninovým prostředím a možný prokluz apod.).

Výstupem práce bylo stanovení napěťo-deformačních stavů a celkové zhodnocení daných návrhů těsnicích zátek, který bude nejvhodnější pro budoucí hlubinné úložiště radioaktivních odpadů. V důsledku zvýšených kontaktních smykových napětí může docházet k porušení tělesa těsnicí zátky v oblasti kontaktu s horninovým prostředím, ke vzniku trhlin a potenciálně k narušení požadované těsnosti zátky. Modelově stanovené posuny zátky ve směru její podélné osy dosahují nízkých hodnot (řádově maximálně cca 1 mm), avšak v reálných podmínkách lze předpokládat vznik trhlin, snížení deformačních modulů materiálů zátky (materiálové změkčení) a nárůst reálných deformací zátky. Po ověření skutečného chování zátky je potřebné využít metod geotechnického monitoringu.

Podle modelového vyhodnocení tří návrhů těsnicích zátek, je nejvhodnější první návrh. Díky tvaru dané konstrukce, složení materiálů a jeho stabilitě. Předpokládá se, že zátka bude uložena v hlubinném úložišti radioaktivních odpadů, je tedy nutné ji navrhnout s životností

cca 150 let při předpokládaném maximálním zatížení 7 MPa. Zátka byla navržena ze dvou hlavních strukturních prvků zajišťující jeho mechanickou stabilitu (konstrukce vnější a vnitřní zátky) a těsnícího prvku (bentonitová část zátky) mezi nimi. Zátka je navržena ze stříkaného vláknobetonu, bentonitu a drenážního betonu.

6. Seznam použité literatury

1. <https://www.surao.cz/rao> [online]. [cit. 2017-11-21].
2. <https://www.surao.cz/rao/puvodci-radioaktivnich-odpadu> [online]. [cit. 2017-11-21].
3. <https://www.surao.cz/rao/ukladani-nizko-a-stredneaktivnich-odpadu> [online]. [cit. 2017-11-21].
4. <https://www.surao.cz/rao/ukladani-vysokoaktivnich-odpadu-a-vjp> [online]. [cit. 2017-11-21].
5. <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/proc-hlubinne-uloziste> [online]. [cit. 2017-11-21].
6. <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/proc-hlubinne-uloziste> [online]. [cit. 2017-11-21].
7. <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/zzs/2016/zpravy-ze-spravy-leto-2016.pdf> [online]. [cit. 2017-11-21].
8. <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/zzs/2016/zpravy-ze-spravy-leto-2016.pdf> [online]. [cit. 2017-11-21].
9. http://www.ita-aitec.cz/files/tunel/2014/2/tunel_2_14-04.pdf [online]. [cit. 2017-11-21].
10. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: Technická zpráva číslo 63/2016 – NAVRŽENÍ, ZAJIŠTĚNÍ PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU EPSP V RÁMCI PROJEKTU DOPAS, ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA
11. <https://ceg.fsv.cvut.cz/o-nas/stola-josef> [online]. [cit. 2017-11-21].
12. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: II. Etapa – varianty řešení a jejich návrh, D. stavební část – podzemí, TECHNICKÁ ZPRÁVA
13. <http://midasgtsnx.com/> [online]. [cit. 2017-11-21].
14. <http://midasgtsnx.com/solutions/tunnels.asp> [online]. [cit. 2017-11-21].
15. <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?granodiorit> [online]. [cit. 2017-11-21].
16. http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/ge10/vlastn_h.htm [online]. [cit. 2017-11-21].
17. <http://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton> [online]. [cit. 2017-11-21].

18. [Http://www.vinarskydum.cz/radce-vinare/vinarovy-postrehy/50-co-je-bentonit-a-jak-se-pouziva](http://www.vinarskydum.cz/radce-vinare/vinarovy-postrehy/50-co-je-bentonit-a-jak-se-pouziva) [online]. [cit. 2017-11-21].
19. [Http://www.bentonit.cz/](http://www.bentonit.cz/) [online]. [cit. 2017-11-21].
20. [Http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/charakteristika-bentonity](http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/charakteristika-bentonity) [online]. [cit. 2017-11-21].
21. [Http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/charakteristika-bentonity](http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/charakteristika-bentonity) [online]. [cit. 2017-11-21].
22. [Http://www.frankenmaxit.cz/media/cmkgatalog/tlmaxitton905pdf.pdf](http://www.frankenmaxit.cz/media/cmkgatalog/tlmaxitton905pdf.pdf) [online]. [cit. 2017-11-21].
23. [Https://www.baumit.cz/media/upload/784.pdf](https://www.baumit.cz/media/upload/784.pdf) [online]. [cit. 2017-11-21].
24. [Http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-06.pdf](http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-06.pdf) [online]. [cit. 2017-11-21].
25. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: Börgesson, L., Chijimatsu, M., Fujita, T., Nguyen, T., and Jing, L.: Thermo-Hydro-Mechanical Characterisation of a Bentonite-based Buffer Material by Laboratory Tests and Numerical Back Analysis. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38 (2001), 95-104
26. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: Jing, L. and Nguyen, T.S.: Implications of Thermal-Hydro-Mechanical Coupling in the Near-Field Safety of a Nuclear Waste Repository. Technická zpráva BMT1A/WP2, SKI report 2005:24, DECOVALEX III/ BENCHPAR Projects, 2005.
27. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: Modeling of Bentonite Hydratiton Using Nonlinear Diffusion Model, I. Skarydova, M. Hokr
28. [Http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/pevnost-hornin.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/pevnost-hornin.pdf) [online]. [cit. 2017-11-21].
29. [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: Skripta – Mechanika podzemních konstrukcí – J. Aldolf
30. [Http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/150/GTX.htm#GTS_NX/Analysis/Analysis_Case/Analysis_Control_\(Option\).htm](http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/150/GTX.htm#GTS_NX/Analysis/Analysis_Case/Analysis_Control_(Option).htm) [online]. [cit. 2017-11-21].

7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Uložení odpadu v sudu [3]	15
Obrázek 2: Model hlubinného úložiště [5]	16
Obrázek 3: Řez hlubinným úložištěm [7]	17
Obrázek 4: Konstrukce zátky [7]	20
Obrázek 5: Schéma štoly Josef	22
Obrázek 6: Geologická mapa Podzemní laboratoře Josef [11]	23
Obrázek 7: Schéma EPSP experimentu [10]	24
Obrázek 8: RTG difrakční záznam B 75_2013 [10]	26
Obrázek 9: Silikátová analýza bentonitu B 75_2013 [10]	27
Obrázek 10: Pelety B75 válcové [10] Obrázek 11: Pelety B75 zlomkové [10]	28
Obrázek 12: Přehled geotechnických aplikací v softwaru MIDAS GTS NX [14]	32
Obrázek 13: Geologie URC Josef [11]	33
Obrázek 14: Nástroj – Line[30]	41
Obrázek 15: Nástroje Divide – Surface [30]	42
Obrázek 16: Nástroj Protrude – revolve [30]	42
Obrázek 17: Dialogové okno pro nástroj – Constraint [30]	43
Obrázek 18: Dialogové okno pro nástroj – Pressure [30]	43
Obrázek 19: Konstrukce zátky s prostorem před a za zátkou	44
Obrázek 20: Ideálně pružnoplastický model	45
Obrázek 21: Mohr-Coloumbova obálka porušení	46
Obrázek 22: Lineárně elastické (pružné) chování	47
Obrázek 23: 1. návrh těsnicí zátky	47
Obrázek 24: 2. návrh těsnicí zátky	49
Obrázek 25: 3. návrh těsnicí zátky	50
Obrázek 26: Posuny při tlaku 7 MPa - 1. Návrh	54
Obrázek 27: Řez zátkou - 1. návrh	54
Obrázek 28: Posuny při tlaku 7 MPa - 2. Návrh	55
Obrázek 29: Řez zátkou - 2. návrh	55
Obrázek 30: Posuny při tlaku 7 MPa - 3. Návrh	56
Obrázek 31: Řez zátkou - 3. Návrh	56
Obrázek 32: 3. Návrh zátky – průběh napětí při tlaku 7 MPa	59
Obrázek 33: Napětí v tahu a tlaku pro 1. návrh	62

Obrázek 34: Napětí v tahu a tlaku pro 2. návrh	62
Obrázek 35: Napětí v tahu a tlaku pro 3. návrh	63
Obrázek 36: Max. smykové napětí – 1. návrh	66
Obrázek 37: 1. návrh - řez max. smykovým napětím.....	66
Obrázek 38: Max. smykové napětí - 2. návrh	67
Obrázek 39: 2. návrh - řez max. smykovým napětím.....	67
Obrázek 40: Max. smykové napětí - 3. návrh	68
Obrázek 41: 3. návrh - řez max. smykovým napětím.....	68
Obrázek 42: Plastické body na Mohr-Colombově obálce pevnosti	69
Obrázek 43: Plastické body - 1. návrh, tlak 2MPa	70
Obrázek 44: Plastické body - 1. návrh, tlak 5 MPa.....	70
Obrázek 45: Plastické body - 1. návrh, tlak 7 MPa.....	70
Obrázek 46: Plastické body - 2. návrh, tlak 5 MPa.....	71
Obrázek 47: Plastické body - 2. návrh, tlak 7MPa.....	71
Obrázek 48: Plastické body - 3. návrh, tlak 5 MPa.....	72
Obrázek 49: Plastické body - 3. návrh, tlak 7 MPa.....	72

8. Seznam tabulek

Tabulka 1: Pevnostní parametry horniny [28]	34
Tabulka 2: Vlastnosti bentonitu - poissonovo číslo [27].....	38
Tabulka 3: Smykové pevnostní parametry [21]	39

9. Seznam grafů

Graf 1: Deformace ve směru osy x při tlaku 2MPa.....	52
Graf 2: Deformace ve směru osy x při tlaku 5 MPa.....	52
Graf 3: Deformace ve směru osy x při tlaku 7 MPa.....	53
Graf 4: Napětí v tahu při tlaku 2 MPa	57
Graf 5: Napětí v tahu při tlaku 5 MPa	58
Graf 6: Napětí v tahu při tlaku 7 MPa	58
Graf 7: Napětí v tlaku při tlaku 2 MPa	60
Graf 8: Napětí v tlaku při tlaku 5 MPa	60
Graf 9: Napětí v tlaku při tlaku 7 MPa	61
Graf 10: Max. smykové napětí při tlaku 2 MPa.....	64
Graf 11: Max. smykové napětí při tlaku 5 MPa.....	64
Graf 12: Max. smykové napětí při tlaku 7 MPa.....	65